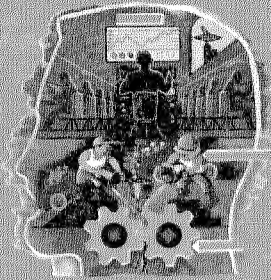


جون ر. بيرس



ترجمة: المهندس فايز فؤاد العاوة

قدمة إلى نظرية المعلومات

الرموز، الإشارات، والضجيج



Bibliotheca Alexandrina



0035252

المعلومات  
(٤)

المشرف الفني : **زهير الحكيمو**

مقدمة إلى نظرية المعلومات

---

العلوم  
٤



حمون ر. بريس

# مقدمة إلى نظرية المعلومات

الرموز، الإشارات، والضجيج

ترجمة:  
المهندس فايز فوه العاوة



منشورات وزارة الثقافة  
في الجمهورية السودانية  
دمشق ١٩٩١

# AN INTRODUCTION TO INFORMATION THEORY

Symbols, Signals & Noise

JOHN R. PIERCE

Professor of Engineering  
California Institute of Technology

Second, Revised Edition

---

An Introduction to = مقدمة الى نظرية المعلومات  
Information theory : الرموز ، الاشارات والضجيج / تأليف  
جون . ر . بيرس ، ترجمة فايز فوق العادة . - دمشق : وزارة الثقافة ،  
١٩٩٠ - ٣٦٨ ص : موضح ، ٢٤ سم - (علوم ، ٤) .

١ - ١٥٣ ١١٠ ب ي ر م ٢ - العنوان ٣ - بيرس ٤ - فوق العادة  
٥ - السلسلة .

مكتبة الاسد

---

الايداع القانوني ع - ٣٩٩ / ٥ / ١٩٩٠

إهداء المؤلف  
إلى كلود  
وبيتي شانون



## مقدمة المؤلف

ان اعادة نشر هذا الكتاب اتاح لي الفرصة لتصحيح كتاب سابق كنت قد الفته منذ حوالي عشرين سنة بعنوان : الرموز ، الاشارات والصحيح ، واعداد النظر فيه بحيث يصبح متمشيا مع الوضع الراهن من التطور . ونظرا لان الكتاب يتعلق بعمل شانون بشكل رئيسي ، والذي سيبقى خالدا الى الابد ، فان اعادة النظر في مؤلفي السابق لم يترتب عليها اجراء الكثير من التغييرات ، ففي بعض الاماكن غيرت التواريخ الخاصة ببعض العلماء الذين نوفوا ، الا انني لم احاول استبدال مصطلح هزة في الثانية ( هـ / نا ) بالمصطلح الاحداث هرتز/ ثانية ( هر / نا ) وكذا لم ابدل في كل المواقع مصطلح شانون : نظرية الاتصالات بالمصطلح الاحداث الذي استخدمه اليوم : نظرية المعلومات .

لقد قمت بتغيير بعض الاشياء ، كاعادة كتابة بعض الفقرات وحوالي عشرين صفحة دون تغيير في ترقيم الصفحات .

ففي الفصل العاشر : نظرية المعلومات والفيزياء ، قمت بتغيير درجة حرارة خلفية الكون من ( درجتين كلفين الى اربع درجات ) وفق كتابي السابق ( لا اعلم من اين اتيت بهذا التقدير في حينه ) ، الى القيمة الصحيحة ٣ كلفين ، كما حددها بنزاييس وويلسون . واستنادا لحقيقة انه في غياب الصحيح يمكننا ان نبش عدد لا حصر له من واحداث البيت في كل واحدة كم ، فقد اضفت مادة جديدة عن التأثيرات الكمية في الاتصالات . كما قمت باستبدال مثال قديم عن الاتصال الففصائي بتحليل مختصر للبت الميكروي لاشارات الصور من مركبة فويجر بقرب المشتري ، كذلك عرضت احتمالات جديدة .

اما في الفصل السابع المعنون « الترميز الفعال » فقد اعدت كتابة بعض الصفحات المتعلقة بالترميز الفعال لمصادر التلفزة وغمرت بعض الفقرات الخاصة بتعديل الترميز النبضي ومرمزات الاصوات . كذلك غمرت في المادة المتعلقة ببحث تصحيح الاخطاء بواسطة الترميز .

وفي الفصل الحادي عشر ، فصل السيبرنيتيك ، اعدت كتابة اربع صفحات عن الحاسبات الالكترونية والبرمجة والتي تقدمت بشكل يفوق التصور خلال العشرين سنة الماضية .

وأخيرا فقد اجريت بعض التغييرات الطفيفة في الفصل السادس عشر القصير والاخير : عودة الى نظرية الاتصالات .

وعلى خلفية هذه التغييرات الفت نظر القارئ الى سلسلة من الابحاث في تاريخ نظرية المعلومات نشرت في دوريات علمية بعنوان محاضر عن نظرية المعلومات وكذلك الى كتابين هامين يتحدثان بتفصيل اكبر عن الوضع الراهن لنظرية المعلومات والجوانب الرياضية للاتصالات هما : نظرية المعلومات والترميز لمؤلفه روبرت ماك اليس ، ومبادئ الاتصالات الرقمية والترميز لمؤلفه اندريه فيتري .

ان عددا من فصول الكتاب الاصلي تتعلق بمواضيع لا تبرز اهميتها الا من خلال تطبيق او محاولة تطبيق نظرية المعلومات .

اعتقد ان الفصل الثاني عشر : نظرية المعلومات وعلم النفس يعطي فكرة معقولة عن نوع التطبيقات الجارية في ذلك المجال . لقد اصبح علماء النفس المعاصرون اقل اهتماما بنظرية المعلومات بالمقارنة مع علم الادراك ، لا افكار مستمدة من علم اصل الانسان واللغويات ، كما يستند الى اعتقاد جازم بان نظاما رياضيا بسيطا وفعالا يكمن في خلفية الوظائف الانسانية . يذكرني علم الادراك المعاصر بعلم السيبرنيتيك قبل عشرين سنة . اما فيما يتعلق بنظرية المعلومات والفن ، فقد حل الكمبيوتر اليوم محل نظرية المعلومات بشكل جزئي ، الا ان المعلومات المتناولة في الفصل

الثالث عشر قد تم تعميقها . ساستعرض بعض الاشعار الجذابة التي انتجتها ماري بوروف ، وغنارجر على الاخص على بعض قواعد الاغاني الشعبية السويدية التي استطاع يوهان ساندبيرغ بواسطتها انتاج عدد من الالحن الاصيله الجميله .

يعود ذلك بنا الى اللغة والفصل السادس : اللغة والمعنى . لقد طرح ذلك الفصل مجموعة من المشاكل لم تحل خلال العشرين سنة الماضية . اننا لا نملك جملة كاملة من القواعد لاي لغة طبيعية ، في حين ان القواعد الحرفية والشكلية اثبتت فعاليتها وبشكل ناجح في لغات الكمبيوتر . لقد تحول الاهتمام في مجال اللغويات ، وفق ما ارى ، الى اعتبارات التصويت في اللغة المنطوقة ، ما هي اهم التراكيب الصوتية وكيف تتفاعل مع بعضها ، ولعل هذه الابحاث من الاهمية بمكان في مجال الكمبيوتر ، اذ يمكن بواسطتها استنتاج الطرق الكفيلة بجعل الكمبيوتر ينطق نصا مكتوبا في ذاكرته . لقد كتب شومسكي وهال كتابا واسعا عن النبرات ، وتناول الموضوع ليبرمان وبرنس في تقرير متكامل مختصر .

هذا هو كل ما يتعلق بالتفسيرات التي اجريتها على الكتاب الاصيلي : الرموز ، الاشارات ، والضجيج ، وعدا ذلك اعود لكرر بعض ما ذكرته في مقدمة ذلك الكتاب .

لقد سررت فعلا عندما اقترح ر. نيومان ان اقوم بتأليف كتاب عن الاتصالات ، وكان ملهمي في عملي التكنيكي هذا الجانب او ذاك من موضوع الاتصالات . وفعلا شعرت ان من واجبي ان انقل الى القراء ما هو اكثر امتاعا وامتناعا من هذا الموضوع . لم يكن تحقيق هذا الهدف امرا سهلا ، سيما قبل عام ١٩٤٨ ، حين اصدر كلود شانون كتابه : ( نظرية رياضية للاتصالات ) . لقد جمعت نظرية شانون في الاتصالات ، والتي عرفت فيما بعد بنظرية المعلومات ، وفي بوتقة واحدة ، كل المشاكل التي كانت قد اقرت مهندسي الاتصالات لسنوات نعم ، كان بإمكان هذه النظرية ان تخلق نظاما جديدا محددا وواضحا وان تطه محل جملة



سابقة من المسائل الخاصة والأفكار المشتتة والتي كان الارتباط بينها غامضاً وغير مفهوم . ولا يستطيع أحد اتهامه بانني من اتباع شانون ، دون نيته مكافأة فعلية لقاء ذلك الاتهام .

وهكذا تملكنتني قناعة كاملة بان تقريري عن الاتصالات يجب ان يعكس وبشكل امين نظرية المعلومات كما صاغها شانون . وكان على تقريري ان يكون اوسع من عمل شانون بتبينه مدى ارتباط النشاطات الفكرية الانسانية المختلفة بنظرية المعلومات ، وكذلك ان يكون اعرض بامتصاده ما امكن عن الزى الرياضي المحض .

هنا برز التناقض . ان تقريري يجب ان يكون اقل رياضية من تقرير شانون ، الا انه ليس بإمكانه ان يكون غير رياضي البتة ، فنظرية المعلومات هي نظرية رياضية تنطلق من فرضيات معينة تصف جوانب من الاتصالات التي ستعرض اليها ، وتصوغ باستخدام هذه الفرضيات استنتاجات منطقية متنوعة . تتجلى عظمة نظرية المعلومات في نظريات رياضية محددة غاية في الاهمية ومدهشة . وما اشبه الحديث عن نظرية المعلومات دون الاقتراب من جهازها الرياضي بالحديث عن مؤلف موسيقي عظيم دون اسماع الآخرين بعضاً من اعماله .

كيف تسنى لي ان اتحرك الى هدي ؟ بدا ان الكتاب يجب ان يكون محتوى في ذاته ، اي يجب ان يحقق فهم الرياضيات التي ينطوي عليها دون العودة الى مراجع اخرى او تذكر بعض مضامين كتب الرياضيات المدرسية ، ككتب المرحلة الثانوية مثلاً . هل يعني ذلك امتناعي عن ذكر اي علاقة رياضية ، كلا بالطبع ، بل يعني ان اعرض الجوانب الرياضية ببساطة وبلغة اولية . لقد فعلت ذلك في متن الكتاب وفي الملحق عند نهاية وباختصار يستطيع أي قارئ غير متمرس بالرياضيات ان يحصل اي اشكال بينه وبين الكتاب بمجرد التنقل بين المتن والملحق .

ماهي حدود الصعوبة التي كان عليّ الاّ اتجاوزها ، كان عليّ ان احدد بشكل مسبق اعقد علاقة رياضية سأتعرض لها ، وهذا يعني تجاوز

بعض النقاط الهامة ، ومهما يكن من امر ، فقد بقي مؤلفي اسهل بدرجة كبيرة من الاقسام الصعبة من كتاب « عالم الرياضيات » مؤلفه نيومان . اما حيث تبلغ المعالجة مدى متقدماً من التعميد فقد آثرت عرض الخطوط العامة للرياضيات على تفصيل مضمونها .

على كل حال ، يتضمن هذا الكتاب بعض المقاطع الصعبة لفهم الملم بالرياضيات ، وانصح القارئ في هذه الحالة بتجاوز تلك المقاطع مكتفياً بنتائجها وحسب . وسيعرف كل القراء حين بلوغ نهاية الكتاب ان ايراد المقاطع الصعبة كان امراً لا مفر منه ، ولعل فهم تلك المقاطع سيكون اكثر يسراً في القراءة الثانية للكتاب . ولو انني لم اضمن كتابي تلك المقاطع لما تمكن القارئ من بلوغ المستوى من فهم الموضوع الذي سيحققه بعد دراسة الكتاب . اما المؤلفات الاخرى في نظرية المعلومات فهي في حدود معرفتي إما غاية في البساطة وإما صعبة لدرجة ان القارئ الجاد وغير الخبير لن يستطيع اجتياز الاقسام السهلة المقابلة للاقسام السهلة من كتابي . اجد من واجبي ان اذكر ان بعض المؤلفات الاخرى في نظرية المعلومات مريكة بحق او هي خاطئة تماماً .

سيبرز ولا شك ، في هذه المرحلة ، تساؤل هام لدى القارئ ، عما اذا كانت نظرية المعلومات تستحق منه او من المؤلف كل هذا العناء . وكل ما استطاع قوله في هذا السياق هو ان نظرية المعلومات تساوي في الاهمية العلم والتكنولوجيا ، لان نظرية المعلومات جزء من عالم العلم والتكنولوجيا . ولعلها مهمة القارئ ان يحاول تكوين صورة مفهومة عن الموضوع والى الحد الذي يريد ، اذا كانت لديه رغبة أكيدة بسبر عالم المعرفة والتكنولوجيا . ان صورة نظرية المعلومات يجب الا تبدو غريبة وغير مفهومة كما ان ادراكها يجب الا يكون سهلاً ودون توظيف ما يلزم من الجهد .

لم يكن تأليف هذا الكتاب امراً يسيراً ، وربما تملد إنجازة لولا سابقة مؤلف كلود شانون . لقد ساهم كلود شانون مساهمة كبيرة في اخراج

الكتاب بقرأته وفي إسداء النصح حول ما يتعلق بضرورة اجراء بعض التغييرات فيه ، اما دافيد سليبيان فقد اخرجني عن مسارب الخطأ بشكل حاسم في حين نهني اي . ن . جيلبرت الى القلط في اكثر من مناسبة . راجع ميلتون باييت الفصل الخاص بنظرية المعلومات والفن مطمئناً اياي بشانه ومقترحاً بعض التغييرات ، وفي مجال علم النفس اهدت من مشورة كل من ب . د . بريكر ، ه . م . جينكنز ، و . ن . شيبارد ، وان كانت الآراء المثبتة في النهاية غير صادرة عنهم . لقد كانت مساعدة م . ف . مانيوز كبيرة ، بينما قدم بينوت ماندلبروت الدعم في كتابة الفصل الثاني عشر ، وقام بقراءة المخطوطة ج . ب . رانيون ، وكشف عن الاخطاء الانشائية إريك وولمان مزوداً ما يلزم من التوجيه . كما انني ادين للبروفسور مارتن هارويت الذي اقنعني واقنع دار نشر دوفر بضرورة إعادة طبع الكتاب . ويدين القارئ بنوره لجيمس . ر . نيومان لحقيقة إيراد خلاصات في نهايات الفصول ، ولحاولاتي أخيراً تبسيط بعض النقاط وجعلها أسهل . انني ادين لكل هؤلاء ، ولا ادين باقل للنسبة ف . م . كوستلو التي استطاعت ان تعيد النظام الى فوضى المخطوطة حيث اعدتها واصلحتها باشكالها . اما بخصوص هذه الطبعة الجديدة فادين بالكثير لسكرتيري السيدة باتريشيا . ج . نيل .

ايلول ١٩٧٩

ج . د . بيرس

## الفصل الأول

### العالم والنظريات

نشر كلود . اي . شانون عام ١٩٤٨ بحثاً بعنوان ( نظرية رياضية للاتصالات ) وتحول البحث إلى كتاب عام ١٩٤٩ . أما قبل ذلك التاريخ فقد اقتصر الأمر على بعض البحاثة المتفرقين يحققون بعض الانجازات المنعزلة في نظرية الاتصالات بين الفينة والأخرى . والآن وبعد حوالي ثلاثين سنة ، أصبحت نظرية الاتصالات ، أو كما تدعى في بعض الأحيان نظرية المعلومات ، مجالاً للبحث معترفاً به . لقد نشر العديد من الكتب حول نظرية الاتصالات وعقدت حولها الندوات والمؤتمرات الدولية .

عيّن معهد المهندسين الكهربائيين والإلكترونيين مجموعة عمل متخصصة في نظرية المعلومات تنشر دراستها بشكل دوري ستة مرات في السنة . كما تنقل مجلات أخرى مقالات متفرقة عن نظرية المعلومات .

نحن جميعاً نستخدم كلمتي الاتصالات والمعلومات ، ومن غير المحتمل أن نقلل من أهميتها . لقد عقب فيلسوف معاصر هو آ. ج. آير على الأهمية القصوى والمعنى الواسع للاتصالات في حياتنا ، فوق رأيه ، لا نقصر مبادلاتنا على المعلومات فقط ، بل نتمدها إلى المعرفة ، الخطأ ، الآراء ، الأفكار ، الخبرات ، الآمال ، الأوامر ، الانفعالات ، العواطف والطباع . إن الحرارة والحركة كليهما يمكن نقلهما ، وكذا القوة ، الضعف والمرض . وينسوه الفيلسوف بأمثلة وتعليقات أخرى عن التظاهرات المريضة والمفزة للاتصال في عالم الإنسان .

وهكذا فالاتصالات بالغة الأهمية ومتنوعة ، ولذا تبرز أهمية نظرية عامة عن الاتصالات ، نظرية متماسكة ومفيدة . أما إذا أضفنا الى كلمة « نظرية » كلمة « رياضية » بكل ما تنطوي عليه من سحر وصرامة ، اذن لاستحالت مقاومة الإغراء ولو تعلمنا بعض العلاقات لحللنا كل مشاكلنا في الاتصالات ولاصبحنا سادة المعلومات عوضاً عن أن نكون عبيد المعلومات الخاطئة .

ولكن للأسف ليس هذا هو مسار العلم ، فعند ٢٣٠٠٠ سنة تناول فيلسوف آخر هو أرسطو في بحثه عن الفيزياء مفهوماً عاماً للاتصالات هو مفهوم الحركة .

عرف أرسطو الحركة بأنها تحقيق ما هو كامن إذا كان موجوداً فعلاً بشكل كامن ، وضمن في مفهوم الحركة الزيادة والنقص لكل ما يمكن أن يزيد أو ينقص ، وأن يقترب أو يبتعد ، وأخيراً ما يمكن بناؤه . تحدث أرسطو عن ثلاثة أصناف من الحركة وذلك وفق شدتها ، تأثيرها ، ومكانها . لقد وجد فعلاً ، كما قال ، أنواعاً عديدة من الحركة تساوي مجموعها عدد المماني المختلفة لكلمة : يكون .

نواجه الحركة هنا بكل تعقيداتها الجلية ، تلك التعقيدات التي تبدو مربكة لنا فعلاً ، لأن ارتباط الكلمات ببعضها يختلف من لغة لأخرى ، وعلى كل حال لن نعني بالحركة كل التفسيرات التي تحدث عنها أرسطو بالضرورة .

لكن كان أمر الحركة هذه محيراً لاتباع أرسطو ! لقد بقي الأمر كذلك حتى جاء نيوتن الذي عبر عن الحركة في قوانين علمية محكمة لا يزال المهندسون يستعملونها حتى اليوم في تصميم وبناء الآلات كما يطبقها الفلكيون في دراسة حركات الكواكب والنجوم والتوابع الصناعية . وقد وجد الفيزيائيون بعد ذلك أن قوانين نيوتن ليس إلا حالات خاصة من قوانين أشمل ، وأن قوانين نيوتن هذه صحيحة إذا كانت السرعة المدروسة صغيرة بالمقارنة مع سرعة الضوء وإذا كان مجال تطبيق الظاهرة

كبيراً بالمقارنة مع الذرة ، وعلى الرغم من ذلك تشكل قوانين نيوتن جزءاً حياً وفعالاً من علمنا الفيزيائي المعاصر ، إذ لم يضعها التطور المعاصر في المتاحف . وإذا كانت الحركة جزءاً هاماً من عالمنا، وجب علينا استعراض قوانين نيوتن فيما يلي :

١ - يبقى أي جسم على حالته من السكون أو الحركة المنتظمة ما لم تؤثر عليه قوة ما .

٢ - يكون التغير في سرعة الجسم في اتجاه القوة المؤثرة عليه ، أما مقدار التغير فيتناسب طردياً مع القوة المؤثرة ومع الزمن الذي جرى خلاله التأثير ، وأخيراً يتناسب مقدار التغير عكساً مع كتلة الجسم .

٣ - عندما يؤثر جسم ما بقوة على جسم آخر ، فإن الجسم الآخر بدوره يؤثر على الأول بقوة تعاكس القوة الأولى بالاتجاه وتساويها بالشدة .

يضاف إلى قوانين نيوتن هذه ، قانون الجاذبية العام :

٤ - تتجاذب أية ذرتين من المادة بقوة محمولة على المستقيم الواصل بينهما وتتناسب شدتها طردياً مع كتلتي الذرتين وعكساً مع مربع المسافة الفاصلة بينهما .

لقد أحدثت قوانين نيوتن ثورة علمية وفلسفية ، فبواسطتها اختزل لابلاس المجموعة الشمسية إلى آلة مفهومة ، وهي التي شكلت القاعدة الأساسية للطيران والصواريخ وكذلك علم الفلك ، وعلى الرغم من ذلك بقيت قاصرة عن الإجابة على أسئلة تتعلق بالحركة طرحها أرسطو . فقد حلت قوانين نيوتن مشاكل الحركة كما عرفها نيوتن وليس كما استخدم الكلمة قدماء اليونانيين في القرن الرابع قبل الميلاد أو ما تنطوي عليه من معاني في لغات القرن العشرين .

تستجيب اللغات المستخدمة لحاجتنا اليومية ، أو لربما تمت

صياغتها استجابة الحاجات أجدادنا . اننا لا نستطيع استخدام كلمة منفصلة لكل شيء أو موضوع اذ لو فعلنا ذلك لقبعنا نخترع الكلمات الى الأبد ، ولذا يصبح الاتصال مستحيلا . واذا رغبنا بامتلاك لغة على الإطلاق فعلينا أن نستخدم كلمة واحدة للدلالة على أشياء أو حوادث عديدة . وهكذا فمن الطبيعي أن نقول أن الرجال والحياد تراكض ( على الرغم من أننا نفضل أن نقول أن الحياد تعدو ) ، وكذلك نجد من الملاثم أن نقول أن محرك السيارة يتحرك وأن السيولة المالية في المصرف تتحرك .

تتعلق وحدة هذه المفاهيم بلغاتنا الانسانية وببدو بعيدة من أي مماثل فيزيائي يمكن للعلم أن يتناوله بسهولة وبدقة . فمن الجنون أن نبحت عن نظرية علمية بسيطة ومتسقة تغطي جريان الماء في الأنابيب وجري العدائين في حلبة السباق . ولعله جنون آخر أن نبحت عن نظرية عامة تغطي كل الحركات التي تحدث عنها أرسطو أو كل أنواع الاتصالات والمعلومات التي اكتشفها الفلاسفة فيما بعد .

نستخدم في لغتنا اليومية الكلمات بشكل يلائم أعمالنا اليومية . لا يسمى العلم لدراسة الكلمات وعلاقتها في مجال دراسة اللغة بحد ذاتها ولكنه يبحث بالقليل في ظواهر الطبيعة ، بما فيها طبيعتنا الانسانية ونشاطاتنا ، ويحاول تجميعها في زمر قابلة للفهم . ينطوي هذا الفهم على قابلية تمييز القواسم المشتركة بين الحوادث المتباعدة ( مثلا حركة الكواكب في السماء وحركة المتزلج على الجليد ) وكذلك على وصف سلوك الظواهر بدقة وبساطة .

تنتمي المصطلحات العلمية الى قاموس كلماتنا اليومية . لقد استخدم نيوتن كلمات : القوة ، الكتلة ، السرعة ، والجاذبية . وعندما تستخدم الكلمات لأغراض علمية تعطى عادة معنى خاصا ، وفي بعض الأحيان معنى جديدا . اننا لا نستطيع التحدث بلغة نيوتن عن قوة الظروف أو كتلة الجماهير ، وأخيرا عن جاذبية بريجيت باردو ، وبالمثل علينا أن نتوقع أن نظرية الاتصالات لن يكون بمقدورها الإجابة وبشكل معقول عن كل سؤال نصوغه متضمنا كلمة الاتصالات أو المعلومات .



لا تقدم النظرية العلمية الصحيحة إلا نادراً ، ان قدمت على الإطلاق ،  
الحلول المرجوة للمشاكل الملحة التي نطرحها بشكل متكرر ، انها لا تعطي  
الاجوبة عن تساؤلاتنا إلا في حالات قليلة ، وهكذا فعوضاً عن عقلنة  
افكارنا ، تقوم تلك النظرية بنبذها ، أو تتركها في احسن الاحوال كما  
هي . تطلعن النظرية الصحيحة وبشكل متجدد على جوانب خبراتنا  
التي يمكن فهمها ببساطة وربطها ببعضها بشكل فعال . سنسعى في هذا  
الكتاب وراء الأفكار المتعلقة بالاتصالات والتي يكمن ربطها وفهمها على  
ذلك النحو .

كيف نستطيع الحصول على نظرية تتعلق بمواضيع خبراتنا ، يتحقق  
انا ذلك عندما نتمكن من عزل أجزاء من خبراتنا قابلة للربط ببعضها ثم  
نقوم بتشريحها وفهمها وتوحيدها . تشكل قوانين نيوتن جزءاً هاماً من  
الفيزياء النظرية ندعوه الميكانيك ، وهي لا تغطي النظرية بأكملها بل هي  
في واقع الامر قاعدة لها ، كفرضيات الهندسة بالنسبة لجسم الهندسة  
ككل . تضم النظرية الفرضيات نفسها الى جانب كل التفاصيل الرياضية  
والاستنتاجات المنطقية التي تترتب بشكل ملزم على الفرضيات . ويتوجب  
على هذه النتائج ان تتناغم مع ظواهر العالم المعقدة حولنا كي تتحقق  
صحة النظرية . ان النظرية غير الصحيحة عديمة الفائدة .

تقرر فرضيات وافكار النظرية بشمولها ، أي مدى الظواهر التي  
تغطيها . وهكذا فقوانين نيوتن للحركة والجاذبية عامة جداً ، فهي تفسر  
حركة الكواكب وخصائص النواص الضابط للوقت وميزات كل انواع  
الات والآليات . إلا ان هذه القوانين تعجز عن تفسير امواج الراديو .

اعلن جيمس كلارك ماكسويل عام ١٨٧٣ من خلال كتابه : الكهربائية  
والمغناطيسية ولأول مرة القوانين الطبيعية التي تربط الحقل الكهربائي  
والحقل المغناطيسي والتيار الكهربائي ، وبين وجود امواج كهرومغناطيسية  
( امواج راديو ) ترتحل بسرعة الضوء . اثبت هراتز ذلك فيما بعد بشكل  
تجريبي ونعلم اليوم ان الضوء هو امواج كهرومغناطيسية . تمثل معادلات  
ماكسويل التعبير الرياضي عن نظريته في الكهربائية والمغناطيسية وهي

الاساس المتين لكل الابحاث الكهربائية . تؤكد ان معادلات ماكسويل تحمل طبيعة عامة جداً ، فهي تفسر كل الظواهر الكهربائية غير الكوانتية . يتناول فرع من النظرية الكهربائية ، يدعى بنظرية الشبكات ، كل الخصائص الكهربائية للدوائر الكهربائية أو الشبكات والتي يمكن الحصول عليها بربط ثلاثة أنواع من العناصر الكهربائية النموذجية : المقاومات ( وهي أجهزة مثل ملفات من أسلاك رفيعة قليلة الناقلية أو رقائق من المعدن أو الفحم تعيق مرور التيار ) والمحرضات ( وشائع من أسلاك نحاسية تلف أحيانا على نوى مغناطيسية ) والمكثفات ( صفائح رقيقة من المعدن تفصلها مادة عازلة كالميكافا أو البلاستيك ، وكانت قارورة لايدن المثال المبكر للمكثفة ) . يقول الفيزيائي أن نظرية الشبكات أقل عمومية من معادلات ماكسويل ، لأن الأولى تتناول الخصائص الكهربائية لبنى فيزيائية خاصة نموذجية ، بينما تتناول معادلات ماكسويل الخصائص الكهربائية لأي جملة فيزيائية بما في ذلك تلك البنى الفيزيائية الخاصة والنموذجية وأيضاً امواج الراديو التي تقع خارج دائرة نظرية الشبكات .

وهكذا ، فإن النظرية الأكثر عمومية والتي تفسر أكبر قطاع من الظواهر هي النظرية الأقوى والاميز ويمكن تخصيصها على الدوام بهدف الانتقال الى الحالات الأبسط . وهذا ما دعى الفيزيائيين للبحث عن نظرية المجال الموحد التي تضم قوانين الميكانيك والجاذبية والكهرطيسية . يبدو جلياً أنه يمكن ترتيب كل النظريات في تسلسل وفق عموميتها . وإذا كان الأمر كذلك فما هو موقع نظرية الاتصالات في مثل هذا التسلسل .

إن الحياة ليست لسوء الحظ على هذه الدرجة من البساطة ، فمن وجهة النظر المطروحة تبدو نظرية الشبكات أقل عمومية من معادلات ماكسويل ، ومن وجهة نظر أخرى هي أكثر عمومية ، ذلك لأن كل النتائج الرياضية المترتبة عليها ممكنة التطبيق في كل الجمل المهتزة المبنية من مركبات ميكانيكية كما هي مطبقة في دراسة وصلات العناصر الكهربائية النموذجية . نجد بناء على ذلك المقابلات التالية : التلخيص في الميكانيك

يقابل المكثفة في الكهرباء، والكتلة تقابل المحرض، بينما المخمدات، كتلك التي تراكب على الأبواب لمنع انصافها تقابل المقاومة. كان من الممكن في واقع الأمر تطوير نظرية الشبكات لدراسة الجمل الميكانيكية، وهي تستخدم فعلاً في دراسة الصوتيات. أما لماذا نشأت نظرية الشبكات من دراسة العناصر الكهربائية النموذجية ولم تنبثق عن دراسة الجمل الميكانيكية، فالإجابة عن ذلك تكمن في السياق التاريخي وليس بالضرورة الملزمة.

نقول ان نظرية الشبكات هي بمعنى ما أكثر عمومية من معادلات ماكسويل، فالأخيرة لا يمكن تطبيقها على الجمل الميكانيكية، بينما الأولى تغطي قطعاً من الجمل الميكانيكية النموذجية والخاصة وقطعاً مناظراً من الجمل الكهربائية النموذجية والخاصة. إلا أنه ومن جانب آخر تبدو معادلات ماكسويل أكثر عمومية من نظرية الشبكات فهي تنطبق على كل الجمل الكهربائية وليس فقط على صنف من الدارات الكهربائية النموذجية الخاصة.

يتوجب علينا الى حد ما قبول هذا الأمر ببساطة دون أن يكون بمقدورنا شرح الحقيقة بشكل كامل، ولكن يمكن أن نقول أن هذا كثير. ان بعض النظريات هي نظريات فيزيائية كقوانين نيوتن ومعادلات ماكسويل، حيث تتناول الأولى الظواهر الميكانيكية بينما تعنى الثانية بالظواهر الكهرومغناطيسية. أما نظرية الشبكات فهي بالضرورة نظرية رياضية، وبدا يمكن أن تمثل رموزها معاني فيزيائية متباينة تتناول الظواهر الميكانيكية مثلما تتناول الاهتزازات الكهربائية.

تمثل النظرية الرياضية في أغلب الأحيان نظرية أو جملة نظريات فيزيائية، إذ يمكنها أن تكون الصياغة الرياضية المتسقة والتي تهدف معالجة جوانب محددة من نظرية فيزيائية عامة. تندرج نظرية الشبكات في هذا الإطار فهي في واقع الأمر الجهاز الرياضي اللازم لدراسة مسلك فيزيائي معين مشترك بين الجمل الميكانيكية والكهربائية، في حين يعالج فرع من الرياضيات يُعرف باسم نظرية الكمون مشاكل مشتركة بين

الحقول الكهربائية والمغناطيسية والجاذبية وإلى حد ما علم الديناميكا الهوائية . تبدو بعض النظريات ، على كل حال ومن النظرة الأولى رياضية أكثر منها فيزيائية .

نستخدم الكثير من هذه النظريات الرياضية في تعاملنا مع العالم الفيزيائي . والحساب واحد من هذه النظريات . فإذا أشرنا ( لعنصر من مجموعة ) من التفاح ، أو الكلاب أو الرجال بالرمز ١ ، ولعنصر آخر بالرمز ٢ ، وهكذا ١٠٠٠٠٠٠٠ ، وإذا استنفدنا بهذه العملية كل الأعداد الطبيعية حتى العدد ١٦ ومتضمناً إياه ، فإننا نشعر بثقة كاملة أنه يمكننا تقسيم المجموعة إلى مجموعتين جزئيتين تحتوي كل منهما على ٨ عناصر (  $16 \div 2 = 8$  ) وأن العناصر يمكن ترتيبها في مربع مقسوم إلى صفوف من المربعات الصغيرة يحتوي كل منها على أربعة مربعات ( لأن ١٦ هو مربع كامل :  $16 = 4 \times 4$  ) . وإذا حللنا أكثر من ذلك رصف التفاحات أو الكلاب أو الرجال بكل الأشكال الممكنة لحصلنا على جملة من المتسلسلات المتباينة يبلغ عددها ٢٠٩٢٢٧٨٩٨٨٨٠٠ متسلسلة وهذا العدد يقابل عدد الامكانات التي نستطيع وفقها كتابة الأعداد من ١ إلى ١٦ بأوضاع مختلفة من حيث جوارها لبعضها . أما إذا استنفدنا في عمليتنا كل الأعداد الطبيعية حتى العدد ١٣ فقط ومتضمناً إياه ، كنا على ثقة كاملة بأن المجموعة يستحيل تقسيمها إلى مجموعات جزئية متساوية لأن العدد ١٣ هو عدد أولي ولا يمكن التعبير عنه كجداء لأعداد أخرى .

لا يعتمد كل ما تناولناه على طبيعة الأشياء موضوع البحث . فإذا ربطنا عناصر مجموعة ما من الأشياء مهما اختلفت طبيعتها بالأعداد الطبيعية ، لما تغيرت النتائج التي نحصل عليها إذا طبقنا عمليات الجمع ، أو الطرح ، أو الضرب ، أو القسمة ، أو حتى إذا رصفنا الأعداد بأوضاع مختلفة . تبدو العلاقة بين الأعداد ومجموعات الأشياء طبيعية جداً للدرجة أننا نستطيع تجاوز حقيقة أن الحساب إن هو إلا نظرية رياضية يمكن تطبيقها على الظواهر الطبيعية في حدود التقابل الممكن بين خصائص الأعداد وظواهر العالم الفيزيائي .

يطالعنا الفيزيائيون على حقيقة هامة مفادها أنه يمكننا الحديث عن مجموع الجسيمات الأولية المنتمة لزمرة معينة ، كالالكترونات مثلاً ، إلا أنه يستحيل أن تربط الأعداد بشكل مفصل لعناصر تلك الزمرة إذ أن الجسيمات الأولية من نفس النوع لا يمكن تمييز أفرادها بعضها عن بعض ، وهكذا يستحيل أن نتحدث عن رصف الأفراد من نوع واحد من الجسيمات الأولية وبأشكال مختلفة كما فعلنا في حالة الأعداد . يترتب على ذلك نتائج هامة في فرع من الفيزياء يدعى بالفيزياء الاحصائية . وعلينا أن نلاحظ أيضاً أنه في حين أن الهندسة الاقليدية هي نظرية رياضية تخدم المساحين والملاحين وبشكل فعال في مشاكلهم العملية ، فإننا نعتقد بشكل جازم أن هذه الهندسة غير دقيقة بما يكفي لتوصيف الظواهر الفلكية .

كيف يمكن أن نصنف النظريات ؟ نستطيع الحديث عن نظرية معينة على أنها ضيقة للغاية أو شديدة العمومية في مجال تطبيقها . يمكننا كذلك تمييز النظريات بكونها فيزيائية أو رياضية ، فالنظرية الفيزيائية هي تلك التي تصف وبشكل كامل مجالا معيناً من الظواهر الفيزيائية ، وهي ظواهر محدودة على الدوام من الناحية العملية . تصبح النظرية أكثر تجريداً ورياضية عندما تتناول صفات منمذجاً من الظواهر أو بعض جوانب الظواهر .

تعد قوانين نيوتن نظريات فيزيائية لأنها تقدم وصفاً كاملاً للظواهر الميكانيكية كحركات الكواكب أو اهتزازات النواس ، أما نظرية الشبكات فهي أقرب إلى مجال الرياضيات أو التجريد ذلك لأنها تصلح لمعالجة أنواع مختلفة من الظواهر الفيزيائية النموذجية . يعد علم الحساب رياضياً وبالغ التجريد ، أنه يغطي أنواعاً عديدة من العناصر الفيزيائية ، إلى جانب أمكانية استخدامه لعد الكلاب وعد الرجال وكذلك لعد الالكترونات ( لنذكر أن الالكترونات غير قابلة للتمييز بين بعضها ) . وأخيراً يصلح علم الحساب لرصد عدد الأيام الماضية .

تندرج نظرية الاتصالات وفق هذه الأطر في عداد النظريات الرياضية

الشديدة العمومية ، وعلى الرغم من انها انبثقت أصلاً من دراسة الاتصالات الكهربائية ، فهي تتناول القضايا بأسلوب مجرد وطريقة معممة . وهي تقدم في واحدة البيت ( Bit ) مقياساً شاملاً للكم المعلوماتي بدلالة الاختيار أو الريبة . تنطوي واحدة البيت المعلوماتية على تحديد أو معرفة الخيار بين بديلين متساويي الاحتمال كرقمين أو رسالتين قيد الإرسال . تطلعنا نظرية الاتصالات على عدد واحدات البيت المعلوماتية التي يمكن إرسالها في كل ثانية عبر اقنية اتصال نموذجية أو غير كاملة وذلك بدلالة التوصيف المجرد لخصائص هذه الاقنية . تعلمنا نظرية الاتصالات كيفية قياس السرعة التي يولد وفقها مصدر مرسل ( كمدياع أو كتابة ) المعلومات المختلفة ، وتعلمنا هذه النظرية أيضاً كيف نرسم أو نمثل الرسائل من مصدر مرسل بكفاءة تسمح بثها عبر قناة من نوع خاص كدارة كهربائية وكذلك تلفت نظرنا الى طرائق تحاشي الأخطاء في الإرسال .

يبدو أحياناً استخدام الفهم الذي توفره لنا نظرية الاتصالات في مجال مسألة خاصة عملية أمراً صعباً ، ذلك لأن هذه النظرية تعرض لمختلف القضايا في عبارات عامة ومجردة ومع ذلك فكون نظرية الاتصالات ذات طابع مجرد ورياضي عام يجعل مجال تطبيقاتها واسعاً . ولنظرية الاتصالات فوائد جمة فيما يتعلق باللغة المنطوقة والمكتوبة ، وكذلك في الإرسال الميكانيكي للرسائل وفي دراسة خصائص الآلات وربما في السلوك البشري أيضاً . ويعتقد البعض أن لهذه النظرية دوراً كبيراً في الفيزياء على نحو سنتطرق اليه فيما بعد في هذا الكتاب .

ومهما يكن من أمر ، فنظرية الاتصالات هي ، بشكل مبدئي ، كما وصفها شانون ، النظرية الرياضية للاتصالات ، اذ تصاغ فيها المفاهيم بعبارات رياضية يمكن أن ترتبط بها امثلة فيزيائية متنوعة . وعلى الرغم من قابلية استخدامها من قبل المهندسين وعلماء النفس والفيزيائيين ، تبقى نظرية الاتصالات نظرية رياضية أكثر منها نظرية فيزيائية أو نفسية أو فناً هندسياً .

ليس من السهل تقديم نظرية رياضية لعامة الناس ، ونظرية الاتصالات نظرية رياضية ، وبذا فالادعاء بإمكانية شرحها دون اللجوء للرياضيات هو أمر ( قد يدعو للسخرية ) . وهكذا سيدهش القارئ عندما يواجه العلاقات والمعادلات في هذه الصفحات : انها تعرض الأفكار التي يرد وصفها بكلمات لقد ضمنت الكتاب ملحقاً رياضياً لمساعدة القارئ غير الرياضي اذا هو رغب بقراءة المعادلات بشكل سليم .

انني على دراية ، في جميع الاحوال ، بما تجلبه صور غير محببة للضرب وللتقسيم وربما للجدور التربيعية ، وايضا المعاناة المضية في الصفوف الثانوية : ان مظهر الرياضيات هذا مظهر مضلل اذ انه يركز في المقام الاول على مصطلحات خاصة وحيل عملية ويضع جانباً وجه الرياضيات الالهم بالنسبة للرياضيين وربما كان القارئ قد واجه النظريات والبراهين في الهندسة او لعله لم يواجهها اطلاقاً ، ورغم ذلك تبقى النظريات والبراهين ذات أهمية قصوى في الرياضيات البحتة والتطبيقية . تلخص النتائج الهامة النظريات المعلومات في شكل نظريات رياضية وهي نظريات لانه يمكن ببساطة البرهان على انها عبارات صحيحة .

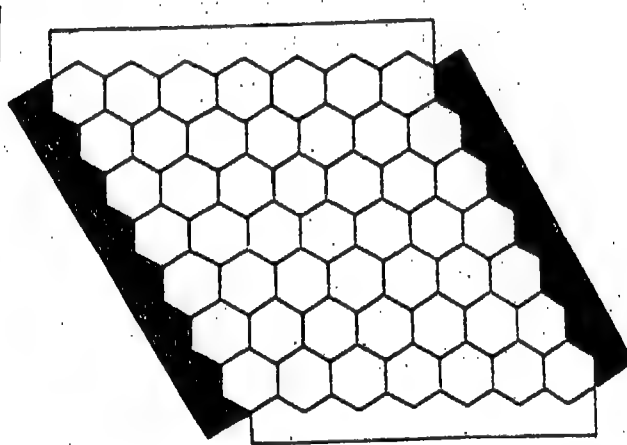
ينطلق الرياضيون من فرضيات وتعريف محددة ، ثم يبرهنون صحة نظريات او قضايا محددة باستخدام براهين وحجج رياضية . كان هذا ما انجزه شانون في كتابه : نظرية رياضية للاتصالات . تتوقف صحة النظريات على صحة الفرضيات الموضوعية والبراهين المستخدمة لاثباتها .

نعم ان كل ما قدمناه هو التجريد ، ولعل انجع وسيلة لايضاح معنى النظرية ومعنى البرهان هي سوق الامثلة . ولن نستطيع فعل ذلك بمطالبة القارئ غير المتخصص ان يتفهم النظريات الصعبة للاتصالات الواحدة تلو الأخرى ، اذ يتطلب هذا الأمر ، في الواقع ، تركيزاً كبيراً كما يستغرق وقتاً لا بأس به حتى من قبل من كانت لديه خلفية معينة من الرياضيات . وخير ما نفعله ان نصل الى محتوى ومعنى وأهمية النظريات .



أقترح في هذا السياق اللجوء إلى أمثلة من نظريات رياضية بسيطة وبراهينها . يتعلق المثال الأول بلعبة اسمها التعويذة ، أما النظرية المراد برهانها فتعنى على أن اللاعب الذي سيفتح اللعبة هو الفائز دون شك .

تجري اللعبة على رقعة تتكون من ( ٤٩ ) مسدساً منتظماً كما يتضح في الشكل ١ - ١ ، حيث يمكن وضع علامات عليها يستخدم اللاعب الأول علامات سودا يحاول توضعها لتكوين مسار مستمر وإن كان متعرجاً بين المساحتين السوداءين على يمين الرقعة ويسارها ، بينما يستخدم اللاعب الثاني علامات بيضاء يحاول توضعها بدوره لتكوين مسار مستمر وإن كان متعرجاً بين المساحة البيضاء في أعلى الرقعة والمساحة البيضاء في أسفلها . يلعب الخصمان بشكل متبادل ، حيث يضع اللاعب علامة واحدة خلال كل لعبة . طبعاً سيفتح اللعبة أحد اللاعبين .



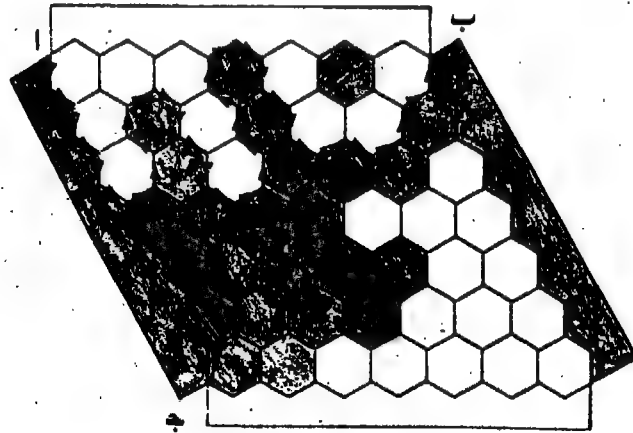
الشكل ١ - ١

لكي نستطيع أن نبرهن على أن من سيفتح اللعبة هو المنتصر ، يلزم أولاً أن نبرهن على أنه في ختام اللعبة ، أي بعد امتلاء كل خانة إما بعلامة سوداء أو بعلامة بيضاء لا بد أن يكون أحد اللاعبين قد انتصر .

النظرية : ١ : ستنتهي اللعبة بفوز اللاعب الاول او اللاعب الثاني .

توضيح : يحدث في بعض انواع اللعب ان مباراة معينة قد تنتهي بعدم فوز اي من المتبارين ، كالشطرنج مثلا حيث تنتهي اللعبة بالانسحاب ، بينما في لعبة ( الطرة او النقش ) سيفوز احد اللاعبين على الدوام . وهكذا ، فلكي نبرهن هذه النظرية علينا ان نبرهن انه بتحقيق امتلاء كل خانة بعلامة بيضاء او علامة سوداء فسنحصل اما على مسار اسود بين المساحتين السوداءين يعترض اي مسار ابيض بين المساحات البيضاء او سنحصل على مسار ابيض بين المساحات البيضاء يعترض اي مسار اسود بين المساحات السوداء . بكلمة مختصرة سيفوز الابيض او الاسود .

البرهان : نفترض ان كل خانة مسددة قد جرى املؤها بالابيض او الاسود . لنبدأ من الزاوية اليسرى العلوية للحدود البيضاء ، أي النقطة ٢ - ١ من الشكل ١ - ٢ ونتابع الحدود بين المسدسات البيضاء والسوداء سنتحرك على الدوام على ضلع من مسدس ما بحيث يقع اللون



الشكل ١ - ٢

الأسود على يمين السائر واللون الأبيض على يسار السائر ، ان الحدود المتابعة بهذا الشكل ستنعطف عند الرؤوس المتتالية للمسدسات اذ سنواجه عند على رأس احدى حالتين متباينتين فلما ان يكون هناك مسدسان اسودان متماسان على يمين السائر ومسدس ابيض على يساره كما في الشكل ١ - ٣ - د ، او ان يكون هناك مسدسان ابيضان متماسان على يسار السائر ومسدس اسود على يمينه كما في الشكل ١ - ٣ - هـ



الشكل ١ - ٣

نلاحظ انه في كلتا الحالتين سيتحقق وجود مسار اسود مستمر على يمين الحدود ومسار ابيض على يسارها . لنلاحظ ايضا ان الحدود لا تتقاطع ولا تندمج مع ذاتها سواء في الشكل ١ - ٣ - د او الشكل ١ - ٣ - هـ ذلك لان مساراً وحيداً عبر كل رأس سيتحقق وقوع الابيض على يمينه والابيض على يساره . سنكتشف ببساطة ان هاتين الحقيقتين صحيحتان للحدود بين المسدسات السوداء والبيضاء وكذلك بينها وبين حدود الرقعة وهكذا فعلى الطرف الايسر سيقع مسار من المسدسات السوداء حتى الحافة السوداء اليسرى . ولما كان خط الحدود غير قابل للتقاطع مع ذاته فلا يمكنه الالتفاف على نفسه كحلقة مفرغة بل لا بد من ان يصل اتفاقاً الى حافة سوداء او الى حافة بيضاء . واذا وصل خط الحدود الى حافة بيضاء او الى حافة سوداء بوجود اللون الاسود على يمينه واللون

الابيض على يساره كما شرحنا، فمن أي مكان باستثناء ب و ج يمكن ان نمد خط الحدود بوجود الاسود الى يمينه والابيض الى يساره و عندها يمكن لهذا الخط ان يصل الى احدى النقطتين ب او ج فاذا وصل الى النقطة - ب - من الشكل ١ - ٢ فان المسدسات السوداء التي تقع على يمينه وهي المسدسات المتصلة بالحافة السوداء اليسرى ستكون متصلة ايضا بالحافة السوداء اليمنى، بينما ستتصل المسدسات البيضاء على يساره بالحافة البيضاء العلوية فقط وسيتحقق عندها فوز الاسود تبدو واضحة في هذه الحالة استحالة فوز الابيض في حالة فوز الاسود اذ ان الشريط المستمر من الخلايا السوداء المتجاورة والممتدة من الحافة اليسرى الى الحافة اليمنى سيحول دون تشكيل شريط مستمر من الخلايا البيضاء حتى الحافة السفلى وبمحاكمة مماثلة نجو ان وصول خط الحدود حتى النقطة ج يعني فوز الابيض .

النظرية : ٢ : يمكن للاعب الذي سيفتح اللعبة ان يحقق الفوز .

توضيح : نعني بالامكانية هنا وجود طريقة للفوز يتوجب على اللاعب ان يكتشفها . تنطوي طريقة الفوز على لعبة اولى معينة ( يمكن ان يكون هناك حركات اولى غيرها ولكنها ليست ضرورية اضافة لخطه او وصفه تحدد اللعبة الصحيحة التالية كرد على اية لعبة قد ينفذها الخصم في المراحل اللاحقة من المباراة ، اي اذ نفذ لاعبا المعبر عند كل دور من ادوار اللعبة المرسومة بشكل مسبق ، عندها سيتحقق الفوز بصرف النظر عن ردود خصمه .

البرهان : اما ان تكون هناك طريقة ما للعب اذا اتبعها اللاعب المعبر فسيحقق الفوز بشكل اكيد ، او انه مهما حاول من امكانات مختلفة للعباته ، فان اللاعب الآخر سيتمكن من اختيار بعض اللعبات التي ستمنعه من تحقيق الفوز ، وهكذا سيتمكن اللاعب الآخر من الفوز . نفترض ان اللاعب الآخر يمتلك وصفا اكيدة للفوز . ونذكر هنا ان اللاعب المعبر هو الذي سيفتح المباراة وان الآخر سيكون التالي بعد الافتتاح بالنسبة

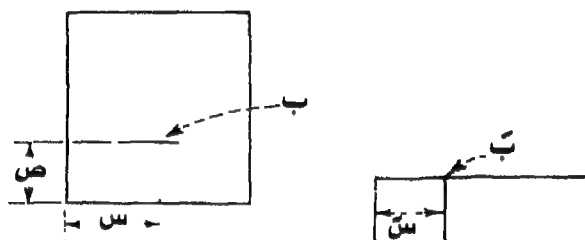
للعبته الاولى . نفرض ان اللاعب المعتبر قد افتتح المباراة بأي لعبة وأن الآخر قد استجاب بلعبة مقابلة ، وبعد ذلك لجأ اللاعب المعتبر الى تطبيق وصفة الفوز الاكيد التي يعرفها اللاعب الآخر أيضا ، وإذا دعت الحاجة تطبيق هذه الوصفة عند أي لعبة الى تغطية سدس كان قد غطاه للتو ، فسيفطي في هذه الحالة أي سدس آخر غير مشغول . وهكذا ستمتلئ كل خانات الرقعة المدرجة في وصفة الفوز الاكيد . ان حقيقة كون لاعبا المعتبر قد افتتح المباراة تعطيه امتياز اشغال خانة اضافية من الرقعة وهذا يحول دون خصمه وتغطية خانة محددة ، في حين ان مثل هذه الاستحالة لا تنطبق على اللاعب المعتبر . وهكذا يمكن للاعب المعتبر ان يشغل كل الخانات الواردة في وصفة الفوز الاكيد وبالتالي يمكنه تحقيق الفوز . ان هذا يناقض فرضنا بإمكانية فوز اللاعب الآخر ، أي ان هذا الفرض بالتالي غير صحيح ، وعلى العكس فسيكون بإمكان اللاعب المعتبر ان يفوز .

يعتبر ارباب الرياضيات المجردة ان برهاننا هذا غير دقيق بما فيه الكفاية ، ولهذا البرهان ميزة عجيبة أخرى ، فهو ليس برهاناً انشائياً أي انه لا يبين الطريقة المفصلة التي يتوجب على لاعبا المعتبر اتباعها لتحقيق الفوز . سنسرد للتو مثالا على برهان انشائي الطابع ، ولكن علينا أولا ان نتحدث من المنظور الفلسفي عن طبيعة النظريات والحاجة لبراهينها .

تنطوي الصياغة الدقيقة للمشاكل العامة او المواضيع المدروسة على النظريات الرياضية . وهكذا فحقيقة ان صاحب حركة الافتتاح في لعبة التعويذة يمكنه الفوز هي ضرورة لازمة لتكوين اللعبة وقواعدها . ان نظريات الهندسة الاقليدية ضرورة ناجمة عن الفرضيات الموضوعة .

كان يمكننا ان نرى صحة النظريات مباشرة بقليل من التأمل وامعان الفكر . يذكر التاريخ في هذا السياق ان نيوتن الشاب قد وجد نظريات اقليدس واضحة بذاتها وانه كان يتألف من قراءة براهينها .

يتوجب على الرياضيين ان يبرهنوا النظريات بغية التأكد من صحتها، هذا على الرغم من ان بإمكانهم تخمين تلك الصحة او الشك بها بشكل مسبق . لقد ادرك نيوتن نفسه أهمية البرهان وقام ببرهان عدد من النظريات باستخدام طرق اقليدس .



### الشكل ١ - ٤

يتحرك الرياضيون ، على نطاق واسع ، خطوة بخطوة لتحقيق الاحاطة المعرفية بمسألة معينة . انهم يبذلون جهودا كبيرة لبرهنة نظرية تلو اخرى وولا يحاولون استكناه جملة من الامور في ومضة . وهم يفعلون ذلك ايضا بهدف اقناع الآخرين .

يحتاج الرياضي احيانا لبرهنة نظرية معينة لاقتناع نفسه بصحتها ، ذلك لان النظرية قد تبدو مخالفة للحس العام . دعونا نعتبر المسألة التالية كمثال : لدينا المربع المبين في الشكل ١ - ٤ والذي يساوي طول ضلعه ١ سم . يمكننا تحديد أي نقطة داخل هذا المربع باستخدام عددين : س : بعد النقطة المعتبرة عن الضلع الايسر للمربع و ص : بعد النقطة المعتبرة عن قاعدة المربع . ان كلا من هذين العددين اقل من الواحد بالطبع ، وهكذا فمن اجل النقطة المبينة على الشكل :

س = ٠.٥٤٧٠١٠٠٠٠٠٠٠٠٠٠٠٠ ( عدد الازهار العشرية لا نهاية له )  
ص = ٠.٣١٢٠٠٠٠٠٠٠٠٠٠٠٠٠ ( عدد الازهار العشرية لا نهاية له )

نقرن كل نقاط المربع مع نقاط مقابلة على المستقيم ، وهكذا فكل نقطة في المربع سيقابلها نقطة على المستقيم وكل نقطة على المستقيم سيقابلها نقطة في المربع . نقول اننا حققنا بذلك ارتساما للمربع على المستقيم وهو ارتسام من النوع المعروف بمصطلح الارتسام واحد - لواحد وذلك للسبب المبين في تعريفه .

نظرية : يمكننا تحقيق ارتسام واحد - لواحد من مربع تساوي مساحته الوحدة الى مستقيم يساوي طوله الوحدة ايضا .

توضيح : لقد بسطنا هذه النظرية واعتبرنا مربعا مساحته الوحدة ومستقيما طوله الوحدة، الا ان هذه التحديدات لاعلاقة لها بصحة النظرية من حيث الاساس .

البرهان : نعتبر الارقام المتتالية المكونة لارتفاع النقطة المعتبر في المربع ص ونكون منها عددا عشريا آخر بوضع هذه الارقام وعلى التالي في المواقع الفردية بعد الفاصلة العشرية أي الموقع الاول والثالث والخامس وهكذا ، اما في المواقع الزوجية فنضع على لترتيب الارقام المكونة لبعء النقطة عن يسار المربع : س . نحصل بهذا التشكيل على عدد جديد س . نعتبر الآن النقطة من المستقيم التي تبعد عن يساره بالمقدار س ولتكن النقطة ب' . ان النقطة ب' هي مرسم النقطة ب المعتبرة من المربع على المستقيم ، وهذا الارتسام هو واحد - لواحد ونبرهن على ذلك ببساطة اذ ان تغيير س او ص سيغير س' الى عدد جديد معين ، بينما تغيير س' سيغير بالمقابل كل من س ، ص . وهكذا فلكل نقطة من المربع معرفة ببعدها س ، ص يوجد نقطة واحدة من المستقيم معرفة ببعدها عليه س' والعكس بالعكس . وهذا هو كل متطلبات ارتسام الواحد - لواحد . يتعرض هذا البرهان لبعض الصعوبات التي يمكن التغلب عليها بسهولة في حالة اعتبار بعض الاعداد الخاصة مثل  $\frac{1}{2}$  اذ يمكن كتابته على الشكل  $0.5$  حيث يتبع العدد 5 للانهاية من الازفار او على الشكل  $0.499999$  ويتبع العدد 4 بعدد لا نهاية له من مكرر العدد 9 . ولو عدنا الى مثالنا عن النقطة المعينة داخل المربع لوجدنا ما يلي :



س = ۵۷۰۰۰۰۰ ر.

۳۱.۲۰۰۰۰۰۰ = ص

$\cdot ۳۵۱۴۲۷ \cdot \dots = س'$

ان سلسلة الارقام العشرية المثلة لنقطة معينة ، في حالة معظم النقاط  
المعتبرة ، لن تحول الى سلسلة من الاصفار او الى جملة مكررة من الارقام  
وينطبق ذلك على النقاط المثلة باعداد صماء .

ان مثالنا هذا هو خير مثال على برهان انشائي ، اذ استطعنا ان نبرهن امكانية ارتسام كل نقطة من مربع على نقطة مقابلة من مستقيم بأسلوب الارتسام واحد لواحد - لواحد وذلك ببساطة عن طريق التحقيق الفعلي لهذا الارتسام . يفضل عدد كبير من الرياضيين البراهين الانشائية على البراهين غير الانشائية ، ويرفض الرياضيون من المدرسة الحدسية البراهين غير الانشائية فيما يتعلق بالمجموعات اللانهائية ، حيث يستحيل تفحص كل عناصر المجموعة بشكل فردي بحثا عن خاصية معينة .

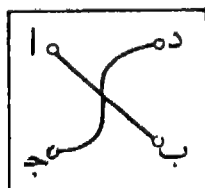
نعتبر الآن قضية أخرى ذات صلة برتسام نقاط المربع على نقاط المستقيم . نتصور ان مؤشرا يتحرك على طول المستقيم وان مؤشرا آخر يتحرك على المربع ليشير بشكل آني الى النقطة من المربع المقابلة للنقطة من المستقيم حيث يمر المؤشر الاول . يمكننا أن نتصور ( خلافا لما سبق ) ببرهانه ) ما يلي : اذا حركنا المؤشر الاول ببطء ونعومة فسيتحرك المؤشر الثاني ببطء ونعومة ايضا ، وهكذا فلكل تجمع من النقاط على المستقيم يشغل حيزا صغيرا يوجد تجمع مقابل من النقاط يشغل حيزا صغيرا من المربع . اذن لو حركنا المؤشر الاول مسافة ضئيلة على المستقيم لتحرك المؤشر الثاني مسافة ضئيلة مقابلة على سطح المربع ولو صغرنا المسافة على المستقيم لصغرنا بالمقابل المسافة المقابلة من سطح المربع ، وهكذا . لو كان ذلك صحيحا لو صغرنا ارسام نقاط المربع على نقاط المستقيم بانه ارسام مستمر .

الا ان الحقيقة هي خلاف ذلك ، فارتسام نقاط مربع على نقاط

مستقيم لا يمكن ان يكون مستمرا بحال من الاحوال . فعندما نتحرك بنعومة وبشكل مستمر على نقاط منحن داخل المربع ، تتحرك النقاط المقابلة على المستقيم بشكل عشوائي قافزة هنا وهناك ، ولا ينطبق ذلك على الارتسام الذي قدمناه للتو ، بل على اي ارتسام واحد - لو احد من المربع على المستقيم . نستنتج من ذلك ان اي ارتسام من المربع على المستقيم هو ارتسام غير مستمر .

نظرية: ان اي ارتسام واحد - لو احد من مربع على مستقيم هو ارتسام غير مستمر بالضرورة .

البرهان : نفرض ان الارتسام واحد - لو احد المعنى هو ارتسام مستمر . اذا كان هذا الامر صحيحا اذن لوجب ان ترسم النقاط من منحن = اختياري آ ب داخل المربع من الشكل ١ - ٥ على النقاط من المستقيم الواقعة بين المرسمين آ ، ب . اما اذا لم يتحقق ذلك اذن لحدث اثناء حركتنا عبر المنحن في المربع ان نقفز من احد طرفي المستقيم الى الطرف الآخر ( ارتسام غير مستمر ) او نعبث نفس النقطة من المستقيم مرتين ( ارتسام غير محقق للشرط الاساسي للارتسام المفترض : واحد - لو احد ) . نختار الآن نقطة ح الى يسار القطعة المستقيمة آ ب ونقطة د الى يمينها ومن ثم نحدد النقاط المقابلة ح ، د داخل المربع .



الشكل ١ - ٥

نرسم المنحني الواصل بين ح ، د والقاطع للمنحني الواصل بين آ ، ب . يتقاطع هذان المنحنيان في نقطة مرتسما على المستقيم يقع بين النقطتين آ ، ب ، أما بقية النقاط من المنحني ح د فيجب أن ترسم على تقاطع تقع خارج القطعة المستقيمة آ ب . وهذا خلاف فرضنا أن الارتسام مستمر . إذن فالارتسام غير مستمر وهو المطلوب .

سنجد فيما بعد أن لهاتين النظريتين أهمية خاصة في نظرية الاتصالات ، ونعني نظرية ارتسام نقاط المربع على نقاط المستقيم وفق ارتسام واحد - لواحد ونظرية كون هذا الارتسام غير مستمر . وهكذا استطعنا برهان نظريتين مفيدتين لنا فيما بعد بخلاف لعبة التويذة .

ان الرياضيات هي طريقة الاكتشاف ، خطوة بخطوة ، لكل الحقائق المتضمنة في صياغة المسائل والتي لا تبدو واضحة للوهلة الاولى . يعني تطبيق الرياضيات أن يستشف المرء أولاً الحقائق بشكل حدسي ثم يعمد الى اثباتها بالبرهان . نصل هنا الى عقدة إشكالية ، فالبراهين التي اقنعت قدماء الرياضيين أصبحت غير مرضية بالنسبة للرياضيين المحدثين .

لقد عبر رياضي معاصر مغمور ونزق ، كان قد راجع أبحاث شلقون في نظرية الاتصالات ، عن شكوكه فيما اذا كان المفزى الرياضي لهذه الابحاث جديراً بالاحترام . تبقى نظريات شانون على الرغم من ذلك صحيحة وقد توفرت لها البراهين المقنعة لأكثر الرياضيين صلابة . ان البراهين التي قدمتها حتى الآن كبيان وعرض للرياضيات معرضة للنقد أكثر من غيرها من قبل دعاة الرياضيات البالغة التجريد .

لقد كان جل ما فعلته الإشارة الى طبهة المحاكمات الرياضية اضافة لاعطاء فكرة من ماهية النظرية وطريقة برهاتها . سننتقل ، وكل ذلك في جمعتنا الى النظرية الرياضية للاتصالات بكل نظرياتها والتي لن نعمد الى برهانها فعلا اضافة لبعض التضمينات والارتباطات التي تمتد وراء كل ما يمكننا برهانه بيقين رياضي .

تتناول نظرية الاتصالات كما اعطانا اياها شانون وكما سبق وقدمت في هذا الفصل مسائل هامة معينة للاتصالات والمعلومات ، ويتسم هذا التناول بكونه شاملاً ومجرداً ، الا ان هذه النظرية غير قابلة للتطبيق على كل ما يمكن صياغته باستخدام كلمتي الاتصالات والمعلومات بمعناها المتداول . تحيط نظرية الاتصالات بكل جوانب الاتصالات التي يمكن تنظيمها وتجميعها بشكل مفيد ومثمر ، تماماً كما تعالج قوانين نيوتن الحركات الميكانيكية فقط باكثر مما تعنى بكل الظواهر المتباينة والمسماة والتي كانت في ذهن أرسطو عند استخدامه لكلمة الحركة .

يحاول العلم ، في سعيه الى النجاح ، التعامل مع الممكن . اننا لا نجد ما يدعونا للاعتقاد ان بإمكاننا توحيد كل الاشياء والمفاهيم التي نستخدم للدلالة عليها نفس الكلمة ، والاجدى ان نسعى الى جوانب الخبرة التي يمكن ربطها ببعضها ، واذا نجحنا في هذا الربط لاصبحنا امام نظرية . ان قوانين نيوتن هي نظرية يمكننا استخدامها في التعامل مع الظواهر الميكانيكية ، بينما معادلات ماكسويل هي نظرية تتناول الظواهر الكهربائية ، واخيراً نستخدم نظرية الشبكات في مجال انواع بسيطة وخاصة من الاجهزة الميكانيكية والكهربائية . يمكننا استخدام علم الحساب بشكل عام جداً لعد الناس ، الاحجار او النجوم ، بينما نطبق الهندسة لقياس الارض ، البحر ، او المجرات .

ان نظرية الاتصالات هي نظرية مجردة بمعنى انها تنطبق على انواع متنوعة من الاتصالات : المكتوبة ، الصوتية ، او الكهربائية وذلك بخلاف قوانين نيوتن للحركة ومعادلات ماكسويل والتي هي نظريات فيزيائية بمعنى انها ترتبط بصنوف معينة من الظواهر الفيزيائية . تعنى نظرية الاتصالات بجوانب هامة ومجردة من الاتصالات ، وهي تنطلق من فرضيات محددة وواضحة لتصوغ نظريات تتعلق بمصادر المعلومات واقتنية الاتصالات . انها بهذا المعنى نظرية رياضية ، ولفهمها ، يتوجب علينا أولاً ان نتفهم فكرة النظرية على انها العبارة التي تتطلب البرهان اي كونها نتيجة لازمة لمجموعة من الفرضيات الاولى . ان هذه الفكرة هي قلب الرياضيات كما يفهمها الرياضيون .



## الفصل الثاني

### أصول نظرية المعلومات

لقد كان الناس دائماً على خلاف فيما يتعلق بقيمة التاريخ فلقد درس بعضهم الاحقاب الغابرة في محاولة استشفاف نظام شامل للعالم يستطيع أن يستجلي بين ثناياه المستقبل والماضي على السواء بينما رأى الآخرون في الماضي وصفات ناجعة للنجاح في الحاضر وهكذا يعتقد البعض أننا بدراسة الكشوف العلمية في وقت ما يمكننا أن نتعلم الاستكشاف بينما يشير أحد الحكماء الى أننا لا نتعلم أي شيء من التاريخ ما عدا أننا لا نتعلم أبداً أي شيء من التاريخ ،، بينما يؤكد هنري فورد أن التاريخ مجرد هراء .

يقع كل ذلك أبعد مما أرمي اليه وأبعد من أهداف هذا الكتاب الا أنني سأظل متمسكاً بأن بإمكاننا أن نتعلم أمرين على الأقل من تاريخ العلم .

أولهما أن أهم الكشوف العلمية وأقواها لم تنبثق من خلال دراسة الظواهر كما تحدث في الطبيعة وإنما من خلال دراسة الظواهر فيما صنعه الانسان وفي المنتجات التكنولوجية اذا صح التعبير ، ذلك أن الظواهر في أدوات الانسان مبسطة ومرتبة بالمقارنة مع تلك التي تقع في الطبيعة وهذه الظواهر المبسطة هي التي يسهل فهمها على الانسان .

لذا فان وجود الآلة البخارية أعطى دفعا قويا لظهور علم الديناميكا الحرارية ( الترموديناميك ) ، وتتجلى في الآلة البخارية ظواهر الحرارة

والضغط والاستبخار والتكاثف بشكل بسيط ومرتب واننا نلاحظ ذلك بشكل خاص في اعمال كارنو . وكان كارنو ( ١٧٩٦ - ١٨٣٢ ) اول من اقترح التمدد المثالي للغازات ( دورة كارنو ) وربط به امكان استخلاص اكبر كمية ممكنة من الطاقة الميكانيكية وذلك من مجمل طاقة البخار المتوفرة . اما معلوماتنا عن علمي تحريك السوائل والغازات فقد تراكمت اثر اختراع الطائرات والسفن وليس بسبب وجود الطيور والاسماك .

واخيراً استطعنا معرفة الكثير عن الكهرباء من خلال الاختراعات الانسانية دون اللجوء الى البروق والصواعق .

وسنجد بشكل مقابل تماماً ، جذور نظرية شانون الانيقية والرجبة في الاتصالات عبر التظاهرات المبسطة والمفهومة والمربطة بالبحث البرقي .

يعلي التاريخ علينا درسه الثاني موضحاً الصعوبات الجمة التي يدفعها الانسان ثمناً للمعرفة والفهم . تبدو قوانين نيوتن في عصرنا بسيطة لا مناص من اللجوء اليها على الدوام ، الا انها كانت في يوم من الايام مجرد حلم عجز امله اكثر الرجال عبقرية وابداً . ان المكتشفين انفسهم يبدوون في كثير من الاحيان مشتتين بشكل ملفت للنظر حقاً . يتوقع احدنا مثلاً ان يجد في بحث ماكسويل عن الكهربائية والمغناطيسية اعلاناً بسيطاً وجريئاً حول القفزة النوعية التي حققها ، على العكس ، ان بحث ماكسويل ذاك تكتنفه الفوضى وتتداخل فيه امور صغيرة بدت في يوم من الايام على قدر من الاهمية بحيث ان اكثر القراء تخصصاً سيصطر للبحث طويلاً عن الاكتشاف الجديد واعادة صياغته على الشكل البسيط المألوف لديه . الا ان ماكسويل كان قد ثبت قضيته بشكل واضح في مخطوطة اخرى .

وهكذا يقدم لنا تمحيص اصول الافكار العلمية فائدة جمة فيما يتعلق باجراء التقييم الحقيقي للجهود التي وظفت بغية الظفر بالمعارف والافكار الجديدة . لقد كان منظراً مألوفاً في الايام الغابرة ان نرى المفكرين

يحمون حول حواف المكتشفات الجديدة دون أن يكون بإمكانهم تنفيذ الخطوة النهائية . نشعر في كثير من الاحيان اننا يجب ان ننوب عنهم بالكلام وتؤكد انهم وصلوا فعلاً الى النتائج النهائية المتوخاة كونهم قد استطاعوا رصف الكثير من الافكار المبتغاة وفق النسق الصحيح . ولعله امر متواتر ان يقع الكثير من الرافضين في فخ مماثل أثناء حياتهم ، فعدد لا بأس به ممن استطاعوا حل مشاكل لم يكن لديهم عنها من معطيات في البداية الا افكار ضئيلة ، اعتقدوا فيما بعد انهم احاطوا بالموضوع وبكل جوانبه وتفاصيله .

لذا فالنتيجة الحتمية ان العودة الى اصول الفكرة تساعد في فهم محتوياتها ، وفي مقدمة تلك الاصول ماذا كانت درجة فهم الموضوع قبل انبثاق الفكرة وكيف تم تحقيق الوحدة والوضوح بعد ذلك . الا ان تحقيق الفهم الصحيح يتطلب منا متابعة المسار الفعلي للاكتشافات ، وليس المسار الذي نشعر ان المكشوف العلمية كان من الممكن او من الواجب ان تسير وفقه ، كما ان علينا ان نقف من المشاكل ( اذا استطعنا ذلك ) كما وقف منها المكتشفون الاوائل لا كما نراها اليوم .

ان التطلع الى معرفة اصول نظرية المعلومات يدفعنا الى متاهات لا نهاية لها كان من الممكن لي ان اتحاشاها بكل سرور ، الا ان الآخرين يدفعون قرائهم على الدوام للدخول فيها . وكل ما أرجوه ان نخرج منها بدون آثار سلبية تذكر سيما اننا سنعرض للموضوع وفق التسلسل التالي .

يستخدم علما الديناميكا الحرارية والميكانيك الاحصائي مصطلحاً خاصاً هو الانتروبي ، كما تستخدم نظرية الاتصالات كمية تسمى الانتروبي ، وننوه هنا الى قدم العلمين الاولين بالمقارنة مع نظرية الاتصالات . لقد استخدم الفيزيائي ل . سزيلارد في بحث له عام ١٩٢٩ مفهوماً معلوماتياً معيناً لتحليل تناقض فيزيائي . نخلص من هذه الحقائق الى نتيجة مفادها ان نظرية الاتصالات قد نشأت بشكل ما من الميكانيك الاحصائي .

لقد سبب هذه الفكرة البسيطة والمضللة فوضى كبيرة حتى بين التقنيين . ان منشأ نظرية الاتصالات يعود الى المحاولات التي جرت لحل بعض المشاكل المتعلقة بالاتصالات الكهربائية ، وقد دعت الانتروبي الخاصة بها بالانتروبي بالمماثلة الرياضية مع الانتروبي الخاصة بالميكانيك الاحصائي . تبرز الاهمية الخاصة لانتروبي نظرية الاتصالات في معالجة جملة من المواضيع مختلفة بشكل كامل عن تلك التي يتناولها الميكانيك احصائي .

تعتمد الانتروبي الخاصة بكتلة غازية في الديناميكا الحرارية على درجة حرارة الغاز وحجمه وكتلته ونوعيته تماماً كما تعتمد طاقتها على نفس العوامل . اذا وضعنا كمية من الغاز في اسطوانة مغلقة ومحكمة الا من احد طرفيها حيث يمكن لمكبس أن يتحرك بحرية وتركنا الغاز يتمدد فان درجة حرارته ستتناقص ويفقد بالتالي جزءاً من طاقته الحرارية ويظهر اثر هذا الانخفاض كعمل دفع على المكبس ، ويمكن لهذا العمل ان يستخدم مثلاً لرفع وزن ما ، وفي هذه الحالة سيدخر الوزن الطاقة التي فقدها الغاز .

ان هذه العملية هي عملية عكوسة ، ونعني بذلك اننا اذا بدلنا عملاً لدفع المكبس نحو داخل الاسطوانة ببطء ولضغط الغاز بالتالي حتى يستعيد حجمه الاصلي واذا ذاك يسترد الغاز طاقته الاولى وكذلك يعود الى ضغطه ودرجة حرارته الاصلين . تتميز هذه العملية العكوسة بثبات الانتروبي وتغير الطاقة خلالها .

تعتبر الانتروبي لذلك مقياساً للعكوسية ، فاذا بقيت الانتروبي ثابتة كانت العملية عكوسة ، ففي مثالنا تتحول الطاقة بشكل متكرر بين شكلها الحراري في الغاز المضغوط وشكلها الميكانيكي في الوزن المرفوع .

ان معظم الظواهر الفيزيائية غير عكوسة . يصاحب العمليات غير العكوسة ازدياد في الانتروبي .



نتخيل على سبيل المثال اسطوانة محكمة لا تسمح بتسرب الحرارة منها واليها ، وقد شطرت الى جزئين . نملأ الجزء الاول بغاز ما ونترك الثاني مفرغاً تماماً . نتصور الان ان الفاصل بين الشطرين قد زال فجأة وبشكل كامل وهذا سيسمح للغاز بالانتشار داخل كل الاسطوانة وسيزيد الانتروبي الا انه سيحافظ على طاقة الغاز دون تغيير .

كان يمكننا قبل زوال الفاصل بين الشطرين الحصول على طاقة ميكانيكية من الغاز بتركه يتدفق داخل الشطر المفرغ من الاسطوانة عبر آلة صغيرة . اما بعد زوال الفاصل بين الشطرين وازدياد الانتروبي فيصبح أمر الحصول على الطاقة الميكانيكية المشار اليها مستحيلاً . تزداد الانتروبي في ظروف مماثلة بينما تبقى الطاقة ثابتة ، ويحدث هذا مثلاً عندما تنتقل الحرارة من جسم ساخن الى جسم بارد ، وقبل تساوي درجتي الحرارة في كلا الجسمين يكون من الممكن الاستفادة من فرق الحرارة للحصول على طاقة ميكانيكية ، اما بعد التساوي فانه يستحيل علينا ان نحول أي جزء من الطاقة الحرارية الى طاقة ميكانيكية .

وهكذا فان ازدياد الانتروبي يعني نقصان قابليتنا لتغيير الطاقة الحرارية وتحويلها الى طاقة ميكانيكية . تقابل زيادة الانتروبي باختصار انخفاضاً في الطاقة الجاهزة .

لقد اعطانا علم الديناميكا الحرارية مفهوم الانتروبي ، الا انه لم يعط تصوراً فيزيائياً مفصلاً لهذا المفهوم بدلالة سرعة الجزيئات ومواقعها مثلاً . يؤمن الميكانيك الاحصائي معنى ميكانيكياً مفصلاً للانتروبي في بعض الحالات الخاصة . وبصورة عامة يترافق ازدياد الانتروبي مع نقصان النظام أي ازدياد الفوضى . أما اذا سألنا ماذا نعني بالنظام ، فعلياً ان تربط النظام بشكل ما مع المعرفة . واذا تمكنا من معرفة موقع وسرعة كل جزيء ضمن تركيب جزيئي بالغاً ما بلغ من التعقيد ، فسيصعب علينا اخراجه عن حالة النظام اذ ذاك . تعني الفوضى في الميكانيك الاحصائي عدم قابلية التنبؤ المستندة الى فقدان المعلومات الضرورية عن مواقع وسرعة

الجزئيات . اننا نفتقد هذه المعلومات في الحالات العادية عندما يكون نظام المواقع والسرع معقدا بدرجة كبيرة .

لنعد الى مثالنا حيث حبست كل جزئيات الغاز في احدى شطري الاسطوانة المعتبرة . اذا كانت هذه الجزئيات بكاملها فعلا في ذلك الشطر واذا كنا بدورنا نعلم ذلك فان الانتروبي ستكون اقل منها في حالة انتشار الغاز في شطري الاسطوانة ، ذلك لان علمنا الاكيد بوجود الجزئيات في الشطر الاول سيؤمن لنا معرفة اكبر عن مواقع الجزئيات بالمقارنة مع الحالة التي ينتشر فيها الغاز عبر شطري الاسطوانة . كلما ازدادت معرفتنا التفصيلية بجملة فيزيائية نقصت ربيتنا بها ( مثلا فيما يتعلق بمواقع الجزئيات ) وكانت الانتروبي بالتالي اقل . وعلى العكس تزداد الرتبة بازدياد الانتروبي .

لذا اربطت الانتروبي في الفيزياء بامكانية تحويل الطاقة الحرارية الى طاقة ميكانيكية . اذا لم تتغير الانتروبي خلال عملية ما ، كانت هذه العملية عكوسة . واذا ازدادت الانتروبي نقصت الطاقة الجاهزة . يفسر الميكانيك الاحصائي ازدياد الانتروبي على انه نقصان في النظام او ، اذا رغبتنا ، نقصان في درجة معرفتنا .

ان تطبيقات وتفاصيل الانتروبي في الفيزياء هي اكبر مما عرضته بكثير ، ولكنني اعتقد انني استطعت ايضاح الفكرة وبعضاً من اهميتها . ننتقل الان الى الاهداف والاستخدامات الاخرى لمفهوم الانتروبي في نظرية الاتصالات .

نعتبر في نظرية الاتصالات مصدر ارسال ككتابة او مذياع ، والذي يمكنه في ظرف معين اصدار رسالة من جملة رسائل ممكنة . يزداد الكم المعلوماتي المنقول عبر الرسالة بازدياد الرتبة المتقلبة لاصدار رسالة معينة . ان الرسالة المصدرة من اصل عشرة رسائل ممكنة تنقل كما معلوماتياً اقل من رسالة منتقاة من اصل مليون رسالة ممكنة . ان انتروبي

نظرية الاتصالات هي قياس لهذه الرتبة ، والرتبة أو الانتروبي هي معيار الكم المعلوماتي المنقول عبر رسالة من مصدر مرسل . ان ازدياد معلوماتنا عن تحديد الرسالة التي ستنشئ من المصدر سيقلل الرتبة وبالتالي الانتروبي وهذا سينعكس في نقص بالكم المعلوماتي .

تترتب نتيجة هامة على ما قدمناه ، وهي ان اختلافا جذريا يميز بين الافكار التي كانت وراء تطوير مفهوم الانتروبي في الفيزياء وتلك التي لعبت دوراً أساسياً في تطوير مفهوم الانتروبي في نظرية الاتصالات . ان كلا من المفهومين فعال ومفيد دون ضرورة العودة الى الآخر . وعلى الرغم من ذلك فانثروبي الميكانيك الاحصائي وانتروبي نظرية الاتصالات يمكن ان يعبر عنهما بدلالة الرتبة في عبارات رياضية متشابهة . نسال هنا عما اذا كان ممكناً صياغة علاقة متميزة ومفيدة بين هذين المفهومين للانتروبي واكثر من ذلك علاقة بين الفيزياء والنظرية الرياضية للاتصالات.

لقد حاول الكثيرون من الرياضيين والفيزيائيين ابراز أهمية نظرية الاتصالات والانتروبي الخاصة بها في مجال الميكانيك الاحصائي ، الا ان هذا الموضوع مازال ضبابياً وغير واضح ، وتزداد حالة التخبط في هذا الموضوع عندما يتسرب أكثر من معنى لكلمة المعلومات الى بحث ما . وهكذا تربط كلمة المعلومات بمفهوم المعرفة وفق معناه المتداول باكثر مما تربط بالرتبة وحل الرتبة كما هو الامر في نظرية الاتصالات .

سنعرض للعلاقة بين الفيزياء ونظرية الاتصالات في الفصل العاشر بعد ان نكون قد بلغنا مستوى جيد من فهم تلك النظرية . وكل مااستطيع قوله الان ان المحاولات الرامية لعقد قران بين الفيزياء ونظرية الاتصالات لم تثمر ومازالت موضع اهتمام كبيرة ، اذ ان تلك المحاولات لم تتمخض عن نتائج اكيدة او تفهم اكبر ، مقابل ما حققتة نظرية الاتصالات ذاتها .

تقع اصول نظرية الاتصالات في الابحاث الخاصة بالاتصالات الكهربائية وليس في الميكانيك احصائي ، كما ان بعض المفاهيم المرتبطة بها تعود الى ولادة الاتصالات الكهربائية .

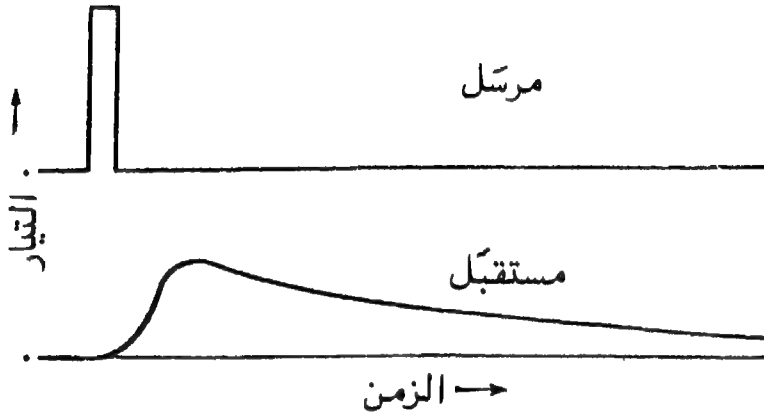
بدا صموئيل ف. ب. مورس اول جهد كبير ناجح لتحقيق الاتصالات البرقية الكهربائية عام ١٨٣٢ خلال رحلة عبر الاطلسي . لقد كانت برقية مورس الاولى اعقد بكثير مما نلم به الآن واحتوت على جملة من الخطوط الطويلة والقصيرة ، ولم تكن سلاسل الخطوط تلك ممثلة للكلمات ، بل مثلت اعدادا . ارتبطت بكلمات في قاموس خاص أو كتاب ترميز اكمله مورس عام ١٨٣٧ . سنرى فيما بعد أن هذه الطريقة للترميز هي طريقة فعالة حتما ، ولكنها طريقة غير مصقولة يعوزها الاتقان .

لقد أهمل مورس طريقة الترميز الاصلية هذه بينما كان يعمل في نفس الموضوع مع الفرد فيل وتم ابتكار ترميز مورس ( شيفرة مورس ) عام ١٨٣٨ تلك الشيفرة التي نستخدمها اليوم . تمثل الاحرف الابجدية وفق هذا الترميز بفراغات وخطوط ونقط فالخط نبضة كهربائية مديدة ، بينما النقطة نبضة كهربائية قصيرة ، وأخيرا يقابل الفراغ انقطاع الموجة الكهربائية .

لقد تم مزج الخطوط والنقاط بمهارة لترميز كل الاحرف الابجدية ، مثلا يتواتر الحرف E في اللغة الانكليزية ضمن معظم الكلمات لذا اختير له اقصر رمز ممكن : نقطة واحدة . لقد تم ترميز الاحرف بصورة عامة بحيث تستخدم الرموز القصيرة للاحرف الأكثر تواترا والرموز الطويلة للاحرف الأقل تواترا . ومن الغرابة بمكان أن هذا الخيار قد تم دون الرجوع الى جداول تبين التواترات المختلفة للاحرف في نصوص اللغة الانكليزية ولم تعد الاحرف في أي نص للحصول على مثل هذه المعلومات . لقد تم الحصول على التواترات النسبية لورود مختلف الاحرف بعد مختلف المطارق في الاجزاء المختلفة لعلبة آلة كتابة .

يمكننا أن نتساءل عما إذا كان باستطاعتنا بث الرسائل باللغة الانكليزية برقيا بسرعة أكبر وذلك بلجوئنا الى ترميز الاحرف بشكل مختلف عن ترميز مورس . تجيبنا نظريتنا المعاصرة اننا لن نحقق زيادة في السرعة بأكثر من ١٥ ٪ لقد كان مورس ناجحا للغاية في هذا المجال ، وكان الامر واضحا بذهنه تماما .

لقد قدم ترميز مورس درساً هاماً مفاده أن الطريقة التي تتم وفقها ترجمة الرسالة إلى إشارات كهربائية لها أهمية كبيرة ويقع هذا الموضوع من نظرية الاتصالات في القلب .

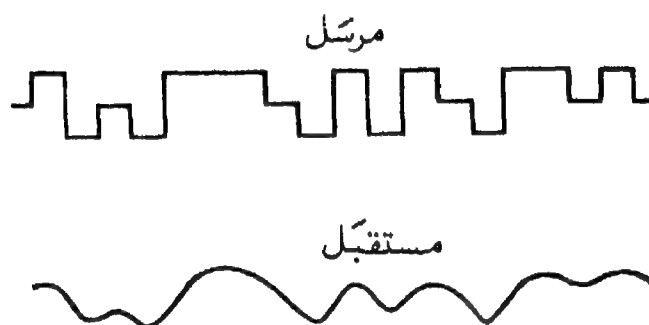


الشكل ٢ - ١

أقر الكونغرس الأمريكي عام ١٨٤٣ ميزانية خاصة لإنشاء دائرة بربقيات بين واشنطن وبالتيمور . بدأ مورس بمد الأسلاك تحت الأرض إلا أنه سرعان ما واجه مصاعب كبيرة تطورت فيما بعد للاضرار بالكابلات تحت المائية ، فلجأ إلى حل مشاكله الآتية بمد الأسلاك على أعمدة .

لقد بقيت المصاعب التي واجهها مورس في أسلاكه الممدودة تحت الأرض بارزة كمسكلة هامة . أن الدارات المتكافئة في نقلها للتيار الكهربائي المستمر ليست جميعها مناسبة بنفس الدرجة للاتصالات الكهربائية . إذا تم إرسال خطوط ونقاط بسرعة كبيرة عبر دائرة تحت أرضية أو تحت مائية ، يجري استلامها عند الطرف الآخر في وقت واحد . يبين الشكل ١ - ٢ أنه عندما نرسل نبضة كهربائية قصيرة بشكل متواتر عبر فترات انقطاع ، فإنها تصل الطرف الآخر من الدائرة على شكل نبضة كهربائية مستمرة ومتصلة ، وربما يتداخل هذا الإرسال الطويل مع الإرسال الخاص

برمز آخر ويحدث نتيجة التداخل كما وان فترة انقطاع قد مرت . وهكذا وكما يبين الشكل ٢ - ٢ ، عندما نرسل قطار من الاشارات متميز وواضح فقد يصل الطرف الاخر على شكل موجة كهربائية مستمرة متلوية صاعدة وهابطة وبالتالي صعبة التفسير . اذا حاولنا جعل الخطوط والنقاط والفواصل أطول زمنا فسيتبع تيار الاستقبال تيار الارسال



الشكل ٢ - ٢

بشكل جيد ، الا ان ذلك سيبطيء سرعة الارسال . ويبدو واضحا ان هناك سرعة حدية لارسال النقاط والفواصل لكل دائرة ارسال . تكون السرعة منخفضة في حالة الكوابل تحت البحرية لدرجة تزيج مستخدمي الاتصال الكهربائي ، بينما تساعدهم الاسلاك الممتدة على اعمدة بسرور ارسالها الكبيرة لقد تنبه المرسلون الاوائل لهذه المشكلة التي تشكل بدورها جزءاً هاماً من نظرية الاتصالات .

يمكن ان نتحايل بأشكال مختلفة على الرغم من هذه المحدودية في السرعة لزيادة عدد الاحرف المرسلة عبر دائرة معينة وخلال فترة زمنية

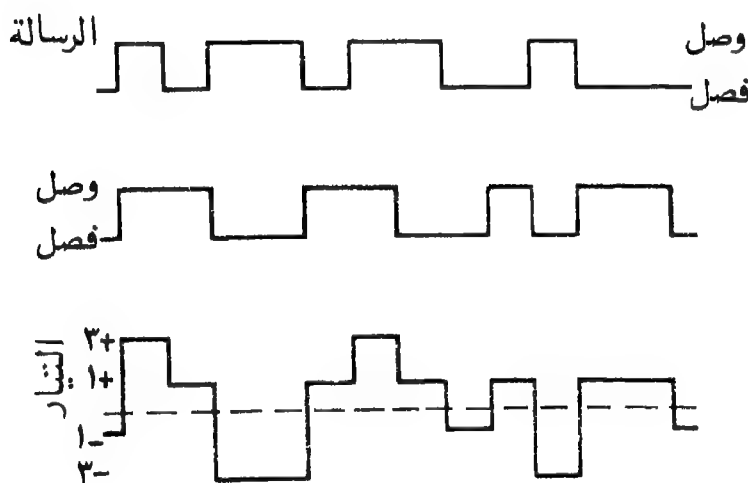
محددة . يستغرق ارسال الخط بلانة اضعاف المدة اللازمة لارسال النقطة . وقد تبينت بسرعة الفوائد الحجة التي يقدمها الارسال مزدوج التيار . يمكننا تفهم ذلك بتصور ربط مقياس غلفاني بين نقطة الاستقبال والارض ، والمقياس الغلفاني هو جهاز يضبط ويحدد اتجاه التيارات الكهربائية الضعيفة . يربط المرسل القطب الموجب من بطاريته الى السلك والقطب السالب الى الارض ، ويتحرك بذلك مؤشر المقياس الغلفاني الى اليمين محددًا نقطة ، ولتحديد خط ، يربط المرسل القطب السالب من بطاريته الى السلك والقطب الموجب الى الارض ، فيتحرك مؤشر المقياس الغلفاني الى اليسار . نصلح بذلك على أن اتجاه التيار في جهة معينة ( داخل السلك ) يمثل نقطة واتجاهه في الجهة المعاكسة ( خارج السلك ) يمثل خط ، بينما يمثل انقطاع التيار الفاصل ( حالة فصل البطارية ) . أما في الحالة الفعلية للارسال المزدوج التيار فيستخدم جهاز مستقبل من نوع مختلف .

نستخدم في الارسال وحيد التيار عنصرين لصنع رموزنا . تيار ولا تيار ، واللذين يمكن أن نسميهما واحد وصفر ، ويقابل ذلك في حالة الارسال مزدوج التيار ثلاثة عناصر هي : التيار الامامي أو التيار داخل السلك ، ولا تيار ، والتيار الخلفي أو التيار خارج السلك ، ويمكن تسميتها أيضا : + ، - ، ٠ . نستخدم هنا اشارتي الزائد والنقص للدلالة على اتجاه التيار بينما يبين العدد ١ شدة أو قوة ذلك التيار وهو في هذه الحالة يساوي لدفق التيار في كلا الاتجاهين .

لقد ذهب توماس ادیسون عام ١٨٧٤ أبعد من ذلك . ففي نظام ارساله الرباعي استخدم شدتين واتجاهين للتيار ، وكان بمقدوره ارسال رسالة أولى بتغيير الشدة وبصرف النظر عن اتجاه التيار وارسال رسالة ثانية بتغيير الاتجاه مهما كانت تغيرات الشدة . اذا فرضنا أن التيارات تفرق عن بعضها بدرجات متساوية ، فاننا نستطيع تمثيل الشروط الاربعة لتدفق التيار باستخدام الاعداد : + ٣ ، + ١ ، - ١ ، - ٣ . يوضح الجدول التالي تفسير ذلك عند النهاية المستقبلية من الدارة .

التيار المرسل		المعنى
		الرسالة الاولى
		الرسالة الثانية
٣ +	مرسلة	مرسلة
١ +	متوقفة	مرسلة
١ -	متوقفة	متوقفة
٣ -	مرسلة	متوقفة

يوضح الشكل ٢ - ٣ كيف يمكن لمتتالية مكونة من اربع قيم مختلفة للتيار تمثيل الخطوط والنقاط والفواصل الخاصة برسالتين آتيتين مستقلتين .



الشكل ٢ - ٣

يتوقف الكم المعلوماتي المرسل عبر دائرة معينة ليس فقط على سرعة ارسال الرموز المتتالية ( القيم المتتالية للتيار ) بل ايضا على عدد الرموز المختلفة المتوفرة والتي يمكن اجراء الخيار بينها ( مختلف قيم التيار ) .



إذا استخدمنا كرمزين التيارين + ١ وصفر فقط أو وبنفس الكفاءة  
التيارين + ١ و - ١ فاننا نستطيع أن ننقل الى المستقبل واحدة فقط  
من امكانييتين عند لحظة معينة . لقد رأينا للتو أنه إذا أجرينا الخيار بين  
اربعة قيم للتيار ( أحد أربع رموز ) في وقت معين مثل : + ٣ أو + ١  
أو - ١ أو - ٣ فاننا نستطيع بقيم التيار هذه الرموز نقل معلوماتين  
مستقلتين : سواء اكنا نعني صفر أو واحد في الرسالة الاولى أو اذا كنا  
نعني صفر أو واحد في الرسالة الثانية . وهكذا فان استخدام اربعة  
قيم للتيار ، ومن أجل سرعة معينة لارسال الرموز المتتالية ، يمكننا من  
ارسال رسالتين مستقلتين وبسرعة لكل منهما تكافئ ما تسمح لنا به  
قيمتان للتيار من سرعة في ارسال رسالة واحدة . اننا نستطيع ارسال  
ضعفه العدد من الاحرف في الدقيقة باستخدام اربعة قيم للتيار بالمقارنة  
مع ما يمكننا ارساله باستخدام قيمتين للتيار .

يقود استخدام التعددية في الرموز الى صعوبات كبيرة . لقد رأينا  
أن الخطوط والنقاط المرسلة عبر سلك تحت مائي تميل الى الانتشار  
والتداخل . لذا فان بحثنا عن رمز معين عند نهاية الدارة سيضعنا في  
مواجهة عدد آخر من الرموز كما يوضح الشكل ٢ - ٢ . وهكذا فالتحديد  
الابسط في مثل هذه الحالات كالتحديد ١ وصفر أو + ١ و - ١ هو في  
واقع الأمر أسهل وأكثر تأكيداً من تحديد معقد مثل + ٣ ، + ١ ،  
- ١ ، - ٣ .

تحد أمور أخرى من قابليتنا لاجراء مفاضلات معقدة ، فمثلا تظهر  
اشارات اضافية على خطوط الارسال والكوابل البحرية ابان العواصف  
المغناطيسية ، اذ أن تغيرات الحقل المغناطيسي الارضي تولد تيارات  
كهربائية في الكوابل ، وهذه التغيرات بدورها تتسبب عن الريح  
الشمسية . وإذا دققنا أكثر باستخدام المضخمات الالكترونية الحساسة،  
لاكتشفنا وجود تيارات كهربائية دقيقة وغير مستحبة بشكل دائم .  
تشبه هذه التيارات الحركة البراونية للذرات الصغيرة المشاهدة  
باستخدام المجهر وأيضا اضطرابات جزئيات الهواء وكل ما يرتبط

بدرجات الحرارة والتغيرات الحرارية . ان التيارات الدخيلة ، والتي ندعوها بالضجيج ، موجودة ومهيأة على الدوام لتتداخل مع الاشارات المرسله .

واذا استطعنا تحاشي ظاهرة التداخل بين النقاط والفواصل والتي نسميها بالتداخل بين الرموز ، فان الضجيج على الرغم من ذلك سيحاول تشويه الاشارة المستقبلية ويزيد بالتالي في صعوبة التمييز بين بدائل متعددة من الرموز . لذا فان زيادة شدة الاشارة المرسله والتي تتحقق بزيادة التيار المرسل ستساعد في التغلب على آثار الضجيج . ومهما يكن من أمر فهناك حدود للطاقة الممكن استخدامها . يستلزم ارسال تيار عالي عبر كابل بحري كمونا عاليا وهذا بدوره يمكن أن يدمر عزل هذا الكابل ، بل ويمكن أن يسبب دارة قصيرة ، ومن المحتمل أن الكمون العالي الدافع الذي استخدم عام ١٨٥٨ أفضل الرسالة البرقية الاولى في كابل عبر الاطلسي .

لقد استطاع حتى رجال البرق الأوائل أن يتفهموا وبالبداهة جانباً لا بأس به من المحدودية في سرعة الارسال ، التداخل ، الضجيج ، وكذلك صعوبة التمييز بين بدائل مختلفة من قيم التيار واخيراً القيم العظمى للطاقة التي يمكن توظيفها . الا ان الحاجة كانت تقضي بتجاوز هذا الفهم البدهي للمشاكل المطروحة الى تحليل رياضي عميق لها .

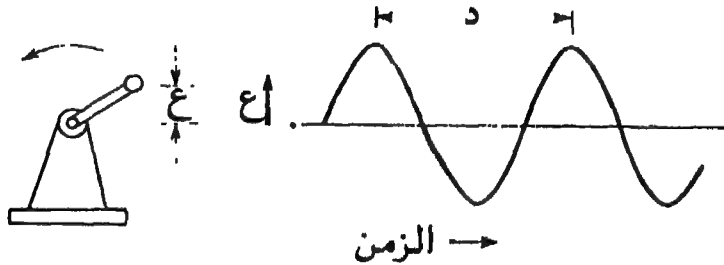
استخدمت الرياضيات منذ وقت بعيد لدى التصدي لهذه المشاكل ، الا أن الايضاح الكامل لها لم يأت الا في السنوات الاخيرة . قام ويليام شومسون ( وعرف فيما بعد بلورد كالفن ) عام ١٨٥٥ بحساب القيم الدقيقة للتيار المستقبل عندما ترسل نقطة أو فاصل عبر كابل بحري . أما التناول الأقوى لهذه المشاكل فقد أعقب اختراع الهاتف عام ١٨٧٥ على يد الكسندر غراهام بيل . لا يستخدم الهاتف الاشارات البرقية البطيئة المستندة لقطع ووصل التيار بل يستخدم جملة تيارات تختلف شداتها بشكل مستمر وناعم عبر ساعات مختلفة وبسرع تعادل عدة مئات السرعة المستخدمة في البرق اليدوي .

ساعد عدد من العقول الجبارة في المعالجة الرياضية لاختراع الاتصال الهاتفي ومن أبرز الاسماء المساهمة : الرياضي الفرنسي العظيم هنري بوانكاريه ، العبقرى الانكليزي المتواضع اوليفر هيفيسايد والمخترع ميشيل بايين واخيرا جورج كامبل من شركة الهواتف والبرق الأمريكية .

كانت الطرائق الرياضية التي استخدمها هؤلاء العلماء امتدادا لتلك التي استخدمها الرياضي والفيزيائي الفرنسي جوزيف فورييه في القرن التاسع عشر لدراسة التدفق الحراري . لقد طبقت هذه الطريقة لدراسة الاهتزازات وكانت وسيلة ناجحة لتحليل التيارات الكهربائية المتغيرة على نحو معقد كما هي الحال في تيارات الهاتف والبرق .

يستحيل علينا التقدم دون فهم بعض مساهمات فورييه ، تلك المساهمات التي أثبتت ضرورتها في كل الاتصالات وفي نظرية الاتصالات . ان الافكار الاساسية ولحسن الحظ بسيطة للغاية ، اما عن براهينها والتعقيدات المترتبة على تطبيقها ، فسنضطر الى حذفها هنا .

لقد بنى فورييه معالجاته الرياضية لمسألة التدفق الحراري على تابع رياضي خاص يعرف باسم تابع الجيب . يوضح الجزء الايمن من الشكل ٢ - ٤ جزءا من هذا التابع .



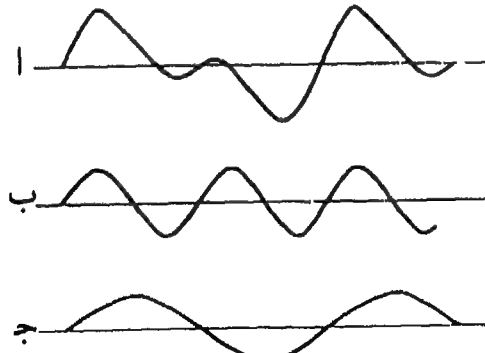
الشكل ٢ - ٤

يتغير ارتفاع الموجة ع نحو الأعلى والأسفل بمرور الوقت ويتكرر هذا التقلب دائماً وأبداً . ليس للموجة الجيبية بداية أو نهاية وهي ليست مجرد منح منتهز مستمر ، اذ أن ارتفاع الموجة ( والذي يمكن أن يمثل شدة التيار أو الكمون ) يتغير وفق إيقاع خاص مع مرور الزمن . يمكننا أن نمثل هذا التغير بحركة ذراع مرتبط بمقبض يدور بسرعة ثابتة ، كما هو مبين في يسار الشكل ٢ - ٤ . يتغير ارتفاع الذراع فوق المحور ع بشكل جيبى تماماً مع الزمن .

ان الموجة الجيبية هي مجرد مثال بسيط للتغيرات في مجرى الزمن . ويمكن أن نعيها أو أن نصفها وأن نميزها عن غيرها من الأمواج الجيبية بواسطة ثلاث كميات ، احدى هذه الكميات هي أكبر ارتفاع فوق الصفر وتسمى السعة ، أما الكمية الأخرى فهي لحظة بلوغ أكبر ارتفاع وتسمى الطور ، وأخيراً الفترة الزمنية الفاصلة بين بلوغين متتالين للارتفاع الأكبر وتسمى الدور . نستعاض عادة عن استخدام الدور باستخدام مقلوبه  $\frac{1}{T}$  ويسمى التواتر ونرمز له بالحرف  $f$  . وهكذا اذا كان دور

الموجة الجيبية  $\frac{1}{100}$  من الثانية كان تواترها ١٠٠ هزة في الثانية

واختصاراً ١٠٠ هـ في ث . وتعرف الهزة على أنها مجمل التغير بدءاً من قمة معينة للموجة مروراً بحضيض لها وحتى قمة تالية . أما كون الموجة الجيبية دورية الطابع فيعني أن التغير المذكور بين قمتين متتاليتين مروراً بحضيض متوسط يكرر نفسه بشكل متطابق تماماً .



الشكل ٢ - ٥

نجح فورييه في البرهان على نظرية حول الامواج الجيبية ادهشت معاصريه كثيراً . فقد اثبت ان تغير اية كمية مع الزمن يمكن ان يمثل بدقة كاملة كمجموع عدد من التغيرات الجيبية تختلف عن بعضها بالسعات والاطوار والتوخرات . ويمكن ان تكون الكمية المعنية انزياح وتر مهتز ، او منسوب الامواج المتلاطمة في البحر ، او درجة حرارة شاردة كهربائية واخيراً شدة او كون التيار في سلك هاتف او مبرقة . ان القوانين الحاكمة لكل هذه الظواهر يمكن ان تخضع لتحليل فورييه ويوضح الشكل ٢ - ٥ هذه القضية بشكل مبسط فارتفاع المنحني الدوري  $\gamma$  فوق المحور يساوي مجموع ارتفاعي المنحنيين الجيبيين ب ، ح .

يبدو تمثيل التغيرات المعقدة مع الزمن لكمية فيزيائية معينة مجموع تغيرات جيبية بسيطة مجرد مهارات رياضية وحسب . الا ان الاستفادة من ذلك التمثيل تستند في واقع الامر الى حقيقتين فيزيائيتين . لا تتغير دارات ارسال الاشارات الكهربائية مع الزمن ويتبع سلوكها ما يدمى بالنمط الخطي . نفرض مثلاً اننا ارسلنا اشارة واحدة ندموها باشارة الدخل عبر السلك ورسمنا منحنيًا يمثل التغيرات الزمنية لسعة الاشارة المستقبلية ، ثم كررنا نفس العمل من اجل اشارة دخل اخرى ، ثم جمعنا اشارتي الدخل اي شكلنا اشارة جديدة يساوي تيارها عند كل لحظة المجموع البسيط لتياري الاشارتين لحصلنا عند ذلك على اشارة مستقبلية جديدة او اشارة خرج تساوي المجموع البسيط لاشارتي الخرج المقابلتين لاشارتي الدخل المعبرتين .

نستطيع ان ندرك على الفور ان دارات الاتصالات لا تتغير على نحو هام مع الوقت . يمكننا شرح مفهوم الخطية كما يلي : اذا عرفنا اشارات الخرج وبشكل منفصل لعدد من اشارات الدخل المرسله بشكل مستقل ، ثم ارسلنا اشارات الدخل هذه في وقت واحد ، فان اشارة الخرج الناتجة في هذه الحالة تساوي المجموع البسيط لاشارات الخرج المنفصلة المشار اليها . وهكذا ففي دائرة كهربائية خطية او نظام بث ، تتصرف لاشارات كما لو كانت موجودة بشكل مستقل عن بعضها ، انها ببساطة

لا تتداخل . نشير هنا الى ان هذا المفهوم الاخير هو في واقع الامر المعيار الذي نحكم بواسطته على دارة ما على انها خطية .

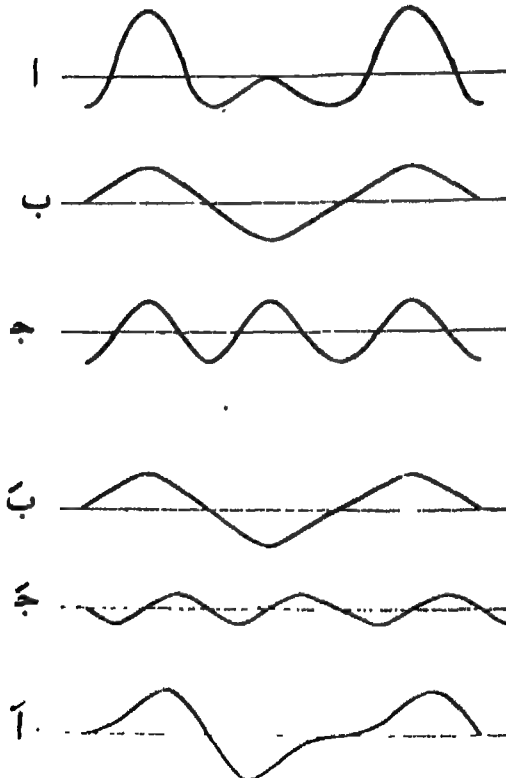
ان كون الخطية تظاهرة مذهشة للطبيعة لا يعني انها نادرة على الإطلاق اذ تشمل صفة الخطية كل الدارات التي قدمنا لها في الفصل الاول والمؤلفة من المقاومات والكثفات والمحثات . كذا شأن الاسلاك والكوابل البرقية . ان كل الدارات الكهربائية ، في واقع الامر خطية ، باستثناء تلك التي تتضمن الانابيب المفرغة او الترانزستورات او الصمامات ، على الرغم من ان هذه الأخيرة تكون في بعض الاحيان خطية فعلاً .

يمكن للإشارتين برقيتين الانتقال باتجاهين متعاكسين عبر سلك واحد وفي وقت واحد دون أن تتداخل ويعود ذلك لكون الاسلاك البرقية خطية اي ان الاشارات الكهربائية المحمولة عليها تتصرف بشكل مستقل دون أن تتبادل التأثير . ليست الخاصة الخطية ظاهرة طبيعية عامة ، رغمًا من كونها مألوفة في الدارات الكهربائية ، فلا يستطيع قطاران مثلاً الحركة باتجاهين متعاكسين على نفس الخط الحديدي دون أن يتداخل . وما على القارئ الا أن يتصور طالع سوء لصف خطي من الكائنات .

دعونا نعد لبث الاشارات عبر الدارات الكهربائية وقد استوعبنا خاصة الخطية المدهشة . لقد رأينا للتو أنه من أجل معظم اشارات المدخل يختلف شكل اشلوة الخرج وتغيرها مع الزمن بالمقارنة مع اشلوة المدخل وقد أوضح الشكلان ٢ - ١ و ٢ - ٢ هذا الامر . الا أنه يمكن ان نبرهن بطريقة رياضية ( لن نفعل ذلك هنا ) اننا اذا استخدمنا اشلوة جيبيية كتلك في الشكل ٤ - ٢ كاشارة دخل الى محور ارسال خطي فاننا نحصل على الاوامر عند المستقبل على موجة جيبيية لها نفس الدور او التواتر ، الا أن سعة موجة الخرج الجيبيية يمكن أن تكون أقل من سعة موجة المدخل الجيبيية ، ويدمى ذلك بتخفيف الاشلوة الجيبيية ، كذلك يمكن لموجة الخرج الجيبيية أن تبلغ الدورة في وقت تالٍ بالنسبة لموجة المدخل الجيبيية ، وهذا ما نسميه بانحراف الطور أو تأخر الاشارة الجيبيية .

يتوقف تخامد الموجة ومقدار تأخرها على تواترها . وفي الواقع قد تعجز الدارة كلية عن نقل موجة جيبيه بتواتر معين . وهكذا اذا استخدمنا إشارة دخل مكونة من عدة مركبات جيبيه سنحصل على إشارة خرج مكونة من عدة مركبات لها نفس التواترات ولكن لها أطوار نسبية مختلفة أو تأخرات وكذلك سعات مختلفة . لذا سيختلف ، بصورة عامة ، شكل إشارة الخرج عن شكل إشارة الدخل ، ويمكن النظر الى هذا الاختلاف على أنه متسبب عن التغيرات في التأخرات النسبية والسعات للمركبات المختلفة وترتبط هذه الفروق بالتوترات المختلفة . اذا كان التخامد والتأخر لدارة معينة غير متغيرين بتغير التواترات ، كان شكل إشارة الخرج هو نفسه شكل إشارة الدخل ، وكانت الدارة غير مشوهة .

لقد اوضحت هذه القضية الهامة في الشكل ٢ - ٦ .



الشكل ٢ - ٦

لدينا في الشكل ٢ - ٦ - ٢ إشارة دخل يمكن التعبير عنها كمجموع مركبتين جيبتين ب' ، ح' . لا يطرأ أي تخفيف أو تأخير على الموجة ب عبر الإرسال وهكذا تكون إشارة الخروج ب والتي لها نفس تواتر ب مطابقة لـ ب' ، إلا أن الخرج ح' قد نابه التخفيف والتأخير بالمقارنة مع الدخل ح' ، وهكذا يكون للخروج آ' ، وهو مجموع الخرجين ب' ، ح' ، شكلاً مختلفاً عن الدخل آ' . يتكون الخروج ، مع ذلك ، من مركبتين لهما نفس التواترين المتواجدين في الدخل ، وكل ما في الأمر أن مركبات التواتر لها أطوار نسبية مختلفة أو تواترات وسعات نسبية مختلفة في الخرج بالمقارنة مع الدخل .

يتيح تحليل فورييه للإشارات إلى مركبات لها تواترات مختلفة دراسة خصائص الإرسال للدائرة خطية ومن أجل كل الإشارات بدلالة الإخماد والتأخر اللذين تفرضهما الدائرة على الأمواج الجيبية المختلفة لتواترات التي تجتازها .

يشكل تحليل فورييه أداة فعالة لدراسة مسائل إرسال . لقد زود ذلك التحليل الرياضيين والمهندسين بنتائج واسعة التنوع لم يستطيعوا في البدء فهمها . لذا اخترع رجال البرق الأوائل كل أنواع الأشكال والتراكيب من الإشارات التي تصوروا أن لها مواصفات معينة ، إلا أنهم في أغلب الأحيان أخطأوا استخدام الرياضيات وكانت مناقشاتهم غير صحيحة . لقد دارت مناقشات حامية حول كفاءة الإشارات المختلفة في الحد من النقائص التي تفرضها سرعة الدائرة وتداخل الرموز ، والضجيج ، وحدود الطاقة المرسله .

انضم هاري نيكويست عام ١٩١٧ إلى الشركة الأميركية للهاتف والبرق وذلك مباشرة بعد حصوله على شهادة الدكتوراه من جامعة يال ( كانت شهادات الدكتوراه نادرة في تلك الأيام ) . كان نيكويست ماهراً بالرياضيات وتفوق في هذا المجال على أقرانه الذين تناولوا مسائل البرق وكان على الدوام واضحاً وأصيلاً ومفلساً لقضايا الاتصالات . لقد





وبأخذ لوغاريتمات الطرفين لهذه المعادلة تثبت لنا صحة العلاقة التالية .

$$\begin{aligned} \text{لع س} &= \text{لع ٢} \\ \text{واذا عوضنا عن لع س بالرمز ع لحصلنا على :} \\ \text{لع ع} &= \text{لع ٢} \end{aligned}$$

وهذا يتفق تماماً مع ما ورد في الجدول أعلاه .  
سنبين من خلال مثال موائمة اللوغاريتم . لعلاقة نيكويست .  
نفرض أننا نرغب بتجديد خيارين مستقلين لحالة الرسالة : مرسل أو متوقفة ، ١ أو . في نفس الوقت . هناك أربعة تراكيب مختلفة للخيارين المستقلين ١ أو . كما هو موضح في الجدول التالي :

رقم التركيب	الخيار الأول . أو ١	الخيار الثاني . أو ١
١	.	.
٢	.	١
٣	١	.
٤	١	١

وإذا أردنا أكثر من ذلك تحديد ثلاثة خيارات مستقلة من الصفر أو الواحد في نفس الوقت نحصل على التراكيب الثمانية المختلفة التالية :

رقم التركيب	الخيار الأول . أو ١	الخيار الثاني . أو ١	الخيار الثالث . أو ١
١	.	.	.
٢	.	.	١
٣	.	١	.
٤	.	١	١
٥	١	.	.
٦	١	.	١
٧	١	١	.
٨	١	١	١

وإذا أردنا وبشكل مماثل تحديدا أربعة خيارات مستقلة من الصفر أو الواحد في نفس الوقت لحصلنا على ١٦ تركيب مختلف ، وبصورة عامة إذا أردنا تحديد ع خيار مستقل من الصفر أو الواحد لحصلنا على ع تركيب مختلف .

إذا استطعنا تحديد ع خيار مستقل من الصفر أو الواحد في وقت واحد لاستطعنا بالنتيجة ارسال ع رسالة مختلفة في نفس اللحظة وتكون سرعة الارسال متناسبة مع ع ، ولكن بارسالنا ع رسالة في نفس الوقت نواجه ٢ تركيب ممكن من ع خيار مستقل من الصفر أو الواحد . وهكذا لارسال ع رسالة في نفس اللحظة نحتاج لارسال ٢ رمز مختلف أو قيمة تيار . نفرض أننا نستطيع الاختيار من ٢ رمز مختلف . يعلمنا نيكويست وجوب حساب لوغاريتم عدد الرموز للحصول على سرعة الارسال ، أي :

$$\text{ل}ع = \frac{ع}{٢}$$

وهكذا فعدد الخيارات المستقلة من الصفر أو الواحد التي يمكن تمثيلها في وقت واحد وهو عدد الرسائل المختلفة التي يمكن ارسالها في نفس اللحظة ، يساوي لوغاريتم عدد الرموز .

تنص علاقة نيكويست على أن الانتقال من البرق المثني الذي يستخدم الفصل والوصل إلى برق التيارات الثلاثة ( ١ + ، ١ - ، ١ ) ، يمكن من زيادة سرعة ارسال الاحرف أو الرموز الأخرى بنسبة ٦٠٪ وإذا استخدمنا أربعة قيم للتيار ( ٣ + ، ٣ - ، ١ + ، ١ - ) فتضاعف السرعة . كان هذا ما فعله بالطبع اديسون في مبرقته الرباعية إذ ارسل رسالتين عوضا عن واحدة . أوضح نيكويست بعد ذلك أن استخدام ثمانية قيم للتيار ( ١ ، ٢ ، ٣ ، ٤ ، ٥ ، ٦ ، ٧ ، ٨ ) أو ( ١ ، ٢ ، ٣ ، ٤ ، ٥ ، ٦ ، ٧ ، ٨ ) ،

١٠ - ٣ - ٥ - ٧) سيضاعف سرعة الارسال اربع مرات بالمقارنة مع قيمتين للتيار . الا انه بين ان الاضطرابات في تخفيف الدارة ، التداخل او الضجيج ، وحدود الطاقة الممكن استخدامها ، كل ذلك سيزيد في صعوبة استخدام عدة قيم للتيار .

عرف نيكويست ، بالعودة الى السرعة التي يمكن ارسال الاشارات وفقها ، سرعة الخط على انها نصف عدد مركبات الاشارة (نقاط ، فواصل ، قيم تيار) التي يمكن ارسالها في الثانية . سنجد ان هذا التعريف اكثر ملائمة على وجه التخصيص لاسباب لم يوضحها نيكويست في بحثه الاول .

كان من المعتاد ارسال الاشارات الهاتفية والبرقية عبر نفس الاسلاك خلال الفترة التي قام عندها نيكويست بابحاثه يستخدم الهاتف تواترات اعلى من ١٥٠ هـ . ف . ث ، بينما يمكن تنفيذ الارسال البرقي بواسطة اشارات ذات تواترات اخفض . اوضح نيكويست كيفية تشكيل الاشارات البرقية بحيث لا يكون لها مركبات جيبية بتواترات عالية للدرجة يمكن معها سماعها كموجة متداخلة عبر الهواتف المربوطة الى نفس الخط . وذهب نيكويست ابعد من ذلك بملاحظته ان سرعة الخط وبالتالي سرعة الارسال تتناسب مع عرض او امتداد مجال او حزام التواترات المستعملة في البرق ، ولعمري الآن في مجال التواترات هذا بعرض حزام الدارة او الإشارة .

برهن نيكويست اخيرا بتحليل صنف معين من الاشارات البرقية ، ان هذه الاشارة كانت تحتوي في كل الاوقات على مركبة جيبية مستقرة ذات سعة ثابتة . لم تكن هذه المركبة بذات فائدة لدى المستقبل ، على الرغم من كونها جزءا من الطاقة المرسل المستخدمة ، اذ كان ممكنا التنبؤ باضطراباتها الدائمة المتواترة وبالتالي تجهيزها عند المستقبل بدلا من ارسالها عبر الدارة . اشار نيكويست الى مركبة الاشارة هذه العديمة الفائدة وذكر انها لا تنقل اي معلومة مفسرة واسماها لذلك فائضة ، وهو مصطلح سنواجهه فيما بعد .

تابع نيكويست دراسة مشاكل البرق ونشر عام ١٩٢٨ بحثاً هاماً آخر بعنوان : ( جوانب هامة من نظرية الارسال البرقي ) اثبت فيه عدداً من النقاط الهامة . بين نيكويست انه اذا ارسلنا عدداً من قيم التيار المختلفة مساوياً ٢ ن في الثانية ، فان المركبات الجيبية للاشارة التي تتجاوز تواترها القيمة ن هي مركبات فائضة ، بمعنى انه لا ضرورة لها اطلاقاً في استنتاج ترتيب قيم التيارات المرسله من خلال الاشارة المستقبلية . شرح نيكويست بعد ذلك كيفية تكوين اشارة لا تحتوي توترات حول القيمة ن ه ف ث والتي يمكن للمستقبل بواسطتها استنتاج قيم التيار المرسله كان هذا البحث الثاني لنيكويست اكثر غنى بالتفاصيل والكميات وادق في نفس الوقت بالمقارنة مع بحثه الاول . يشكل هذان البحثان المادة الأكثر أهمية المتضمنة في نظرية الاتصالات .

كان ذهن ر. ف. ل. هارثلي منشغلاً في نفس الوقت بالابعاد الفلسفية لارسال المعلومات ، وهارثلي هو مخترع الهزاز المعروف باسمه هزاز هارثلي . وقد لخص تأملاته في بحث نشره عام ١٩٢٨ بعنوان ( ارسال المعلومات ) .

لقد كان لهارثلي طريقة مشوقة في صياغة مسألة الاتصالات ، وهي واحدة من طرائق وضع القضايا بالشكل المباشر والواضح خاصة ثوب البداهة الذي تبدو به عند عرضها ولكنها وعلى الرغم من ذلك تحتاج لسنوات حتى تتنامى النظرة الثاقبة التي تؤهل احداً ما لبسطها رأى هارثلي المرسل وقد جهز بمجموعة من الرموز ( احرف الابجدية مثلاً ) يمكنه انتقاء ما شاء منها بشكل عقلي وارسالها رمزاً بعد رمز مولداً بذلك سلسلة من الرموز ، ولاحظ أن حدثاً تصادفياً كدحرجة عدد من الكرات في مجموعة من الجيوب يمكنه بشكل مماثل لتوليد هذه السلسلة . عرف بعد ذلك المعلوماتية في الرسالة ورمز لها بالحرف ه ، ووافق تعريفه تساوي ه لوغاريتم عدد كل الاشكال المختلفة للسلسلة التي كان يمكن اختيارها ، وبرهن أن : ه = ل لع س ، حيث ل هو عدد الرموز المكونة للسلسلة ، و س عدد الرموز في المجموعة التي يتم انتقاء الرموز المكونة للسلسلة منها .

بعد ما قدمناه مقبولا في ضوء معارفنا المعاصرة عن نظرية المعلومات اذا تم انتقاء الرموز المتتالية بشكل مستقل وكانت رموز المجموعة متكافئة في احتمال انتقائها . وكل ما يلزمنا في هذه الحالة ان نلاحظ كما في السابق ان لو غار يتم عدد الرموز  $s$  أي لع  $s$  يساوي عدد الخيارات المستقلة للصفر أو الواحد التي يمكن تمثيلها أو إرسالها في وقت واحد ولعله أمر منطقي أن تساوي سرعة إرسال المعلومات جداء سرعة إرسال الإشارات في الثانية :  $L$  وعدد الخيارات المستقلة للصفر أو الواحد المحمولة في كل إشارة .

ذهب هارتلي أبعد من ذلك بتناوله موضوع ترميز الرموز الأولية ( أحرف الأبجدية مثلا ) بدلالة الرموز الثنائية ( مثلا سلاسل النقاط والفراغات والخطوط وفق ترميز مورس ) ، وبرهن أن البث الأسرع للرسائل يتطلب أن تكون أطوال الرموز الثانوية ( تمثيل مورس الرمزي ) محكومة بقيود اختيار الرموز ( مثلا حقيقة أن الحرف E في اللغة الانكليزية أكثر تواترا وبالتالي أكثر اختيارا من الحرف Z ) . كنا قد أوضحنا أن مورس نفسه قد تفهم هذا الأمر إلا أن هارتلي وضعه في صيغة سهلة المنال سيما الطرائق الرياضية وفتح ذلك الباب على مصراعيه أمام أبحاث أخرى تالية . اقترح هارتلي خطة التطبيق هذه الاعتبار على الإشارات المستمرة كإشارات الهاتف أو إشارات الصور .

أثبت هارتلي أخيراً وبما يتلاءم مع نيكويست أن كمية المعلومات الممكن إرسالها تتناسب مع جداء عرض الحزام في وقت الإرسال . إلا أن ذلك يضعنا في حيرة من عدد قيم التيارات المسموحة والتي لها أهميتها أعلى سرعة الإرسال . كيف يمكن أن نرقمها .

مرت نظرية الاتصالات بفترة طويلة من الاسترخاء والراحة بعد نيكويست وهارتلي . إذ انشغل العاملون فيها بدراسة وبناء أنظمة اتصالات متخصصة . وتطور هذا الفن إلى أشكال معقدة فعلا خلال

الحرب العالمية الثانية . لقد تم استيعاب انظمة واجهزة اتصالات جديدة على حساب قصور كبير في صياغة المبادئ الفلسفية .

كان امراً هماً اثناء الحرب معرفة مسارات الطائرات من خلال معلومات رادارية غير دقيقة يشوبها الضجيج ، وذلك لتسهيل اسقاط تلك الطائرات . ودفع هذا بدوره الى السطح قضية اخرى : ماذا لو مثل تيار كهربائي متغير المعلومات الخاصة بموقع طائرة ولكن قد اضيف اليه تيار شائب آخر لا معنى له أي ضجيج . يمكن ان تكون التواترات الاكثر وروداً في الاشارة مختلفة من التواترات الاكثر وروداً في الضجيج ، عندها يكون من المرغوب فيه تمرير الاشارة والضجيج المضاف اليها في دائرة كهربائية او مرشح تضعف بنتيجته التواترات الواردة في الضجيج بينما لا تتأثر تلك الواردة في الاشارة . يمرر بعد ذلك التيار الكهربائي الناتج في دارات اخرى في محاولة لمعرفة ماذا يمكن ان تكون عليه الاشارة الاصلية من دون ضجيج بعد ثوان قليلة من اللحظة الراهنة . ماذا يمكن ان يكون ذلك النوع من تركيب الدارات الكهربائية الذي سيسمح باحسن تنبؤ عن قيمة الاشارة الحقيقية بعد ثوان في المستقبل اعتباراً من الاشارة الحالية المشوبة بالضجيج .

نتناول في هذه المسألة اساساً مجموعة كاملة من الاشارات الممكنة ( مسارات للطائرة ) وليس اشارة واحدة وهكذا فليس في مقدورنا ان نحدد مقدماً أي الاشارات تهمننا ، والاسوا من ذلك اننا نتعامل مع ضجيج لا يمكن التنبؤ به .

لقد حل هذه المشكلة في الاتحاد السوفييتي العالم كولوموغروف ، بينما حلها في امريكا وبشكل منفصل العالم نوربرت وينر . كان وينر رياضياً اهله خلفيته لمعالجة هذا النوع من المسائل واكمل اثناء الحرب وثيقة دميت بالخطر الاصفر لما سببته من صدام لدارسيها حل فيها المسألة الصعبة بشكل كامل .

شهدت فترتا الحرب وما بعدها انشغال رياضي آخر هو كلود .  
أي شانون بالحالة العامة لمسألة الاتصالات بدأ شانون باعتبار  
حسنة أنظمة الاتصالات الحديثة وسمى لايجاد معيار أساسي لمقارنة  
ميزاتها . نشر شانون عام ١٩٤٨ . بحثا في جزئين يعتبر القلعة  
الأساسية لنظرية الاتصالات المعاصرة ، ونشر واينر في نفس العام  
كتابه ( السبيري نيك ) والذي يعرض للاتصالات والتحكم .

يتناول شانون وواينر على حد سواء مشكلة الاحاطة بأي إشارة  
منتقاة من زمرة او مجموعة من الرموز الممكنة وليس مشكلة إشارة  
واحدة بحد ذاتها . لقد حدث تبادل حر للأفكار بين مختلف العاملين في  
المعلوماتية قبل نشر بحث شانون وكتاب واينر ، حيث تظهر افكار  
وعبارات متشابهة في المرجعين ، الا ان تفسير شانون يبقى مع ذلك  
وحيدا من نوعه .

ارتبط اسم واينر مع مهمة استخلاص اشارات مجموعة معينة من  
ضجيج معروف النوعية . سبق ان قدمنا آفا مثالا عن ذلك . يتبع  
الطيار المعادي مسارا يختاره بنفسه ، وتضيف أجهزة رادارنا ضجيجا  
طبيعي المنشأ الى الاشارات الممثلة لموقع الطائرة . وهكذا يصبح لدينا  
مجموعة من الاشارات الممكنة ( المسارات المحتملة للطائرة ) الخارجة عن  
دائرة اختيارنا مزوجة مع ضجيج هو بدوره ليس من اختيارنا وعلينا  
ان نصل الى التقدير الأمثل لقيمة الإشارة الحالية او المستقبلية ( الموقع  
الحالي او التالي للطائرة ) وبصرف النظر عن الضجيج المتواجد .

أما اسم شانون فقد اقترن بمواضيع أخرى كترميز رسائل منتقاة  
من مجموعة معينة بحيث يمكن نقلها بوجود الضجيج بسرعة وبدقة وعلى  
سبيل المثال نفترض أن لدينا مصدرا للإرسال هو نص باللغة الانكليزية  
لم نعلم باختيلره ، إضافة لدائرة كهربائية ككابل برق مشوب بالضجيج ،  
هو بدوره ليس من اختيارنا أيضا . الا أن المسألة التي عالجها شانون  
تسمح لنا اختيار طريقة ترميز الرسالة بإشارة كهربائية وكم هي القيم



المختلفة للتيار الكهربائي التي سنسمح بها مثلا وما هو عدد ما سنرسله منها في كل ثانية . ليست المسألة اذن هي معرفة طريقة معالجة الإشارة والضجيج المضاف اليها بهدف الوصول الى افضل تقدير للإشارة ، بل هي تحديد نوعية الإشارة المزمع ارسالها لتحقيق ايصال امثل للرسائل التي هي من نمط معين عبر نوع محدد من الدارات التي يشوبها الضجيج .

تشكل قضية الترميز الفعال هذه مع نتائجها المادة الرئيسية لنظرية المعلومات حيث تعتبر مجموعة من الرسائل ، ويعكس البحث روح اعمال كل من كولوموفرووف ، واينر موريس ، وهارتلي .

لعله من غير المجدي ان نحاول هنا مراجعة اعمال شانون ، سيما وان هذا الكتاب برمته يدور حول هذه الاعمال وسنرى فيما بعد ان هذه الاعمال تلقي اضاءا كاشفة على المشاكل التي اثارها نيكويست وهارتلي وتذهب بعيدا وراء تلك المشاكل<sup>١٥</sup> .

يجب ان نذكر اسمين آخرين عند استعراضنا لنظرية المعلومات نشر دينيس غابور عام ١٩٤٦ بحثا بعنوان نظرية الاتصالات ، ومهما كان من ابعاء هذا العنوان فقد فات البحث تضمين الضجيج الذي يقع في القلب من نظرية الاتصالات المعاصرة . شهد عام ١٩٤٩ بحثا آخر لتالر بعنوان الحدود النظرية لسرعة ارسال المعلومات ، وكان هذا البحث موازيا لعمل شانون وبشكل جزئي .

لقد انطوى جوهر هذا الفصل على حقيقة مفادها ان نظرية الاتصالات العامة التي قدمها لنا شانون قد نمت وترعرعت من دراسة المسائل المتخصصة للاتصالات الكهربائية . واجه مورس مشكلة تمثيل الاحرف الابجدية بنبضات كهربائية طويلة او قصيرة تتخللها فواصل لا نبض فيها - أي بخطوط ونقاط وفراغات البرق الممهودة . لقد اختار وبشكل صائب تمثيل الاحرف المتواترة بتراكيب قصيرة من الخطوط والنقاط والاحرف النادرة بتراكيب اطول ، وكان هذا الخيار الخطوط الاولى في الترميز الفعال للرسائل ، وهو ركن اساسي من نظرية الاتصالات .

استخدام تلاميذ مورش شدات واتجاهات مختلفة لدفق التيار الكهربائي بهدف إعطاء المرسل فرص أكثر لانتقاء الإشارات بالمقارنة مع الخيارين التقليديين : إرسال أو توقف . زاد ذلك من عدد الاحرف المرسل في واحدة الزمن ولكنه رفع من حساسية الإشارة لاي اضطراب كهربائي غير مرغوب فيه مما يسمى بالضجيج كذلك قلل من امكانات الدارات للاستجابة السريعة في حالات التفريغ السريعة للتيار .

برزت الحاجة لتقييم الميزات النسبية لعدد متنوع من الإشارات البرقية ، وكان لا بد من اداة رياضية لتحقيق ذلك . وليس غريباً أن يكون تحليل فورييه هو الاداة ، إذ بواسطة ذلك التحليل يمكن تمثيل اية إشارة كمجموع امواج جيبية ذات تواترات مختلفة .

إن معظم دارات الاتصالات من النوع الخفي ويعني ذلك أن تواجد عدد من الإشارات في نفس الدارة لا يؤدي لاي تدخل أو تبادل للتأثير بينها . ويمكننا ان نبرهنه إن اثر الدارة الخطية على الموجة الجيبية ينحصر باضعافها أو تخفيفها وتأخير زمن وصولها هذا على الرغم من حقيقة أنه حتى الدارات الخطية قد تفيد في أشكال معظم الامواج . وهكذا فعندما تمثل موجة معقدة كمجموع امواج جيبية بتواترات مختلفة، يمكن اجراء حساب بسيط لاثر الدارة الخطية على كل مركبة جيبية بشكل منفصل وبجمع المركبات الجيبية المخففة أو المضعفة نصل الى قيمة الموجة المستقبلية . المقابلة للموجة الاصلية المعقدة .

اثبت نيكويست أن عدد قيم التيار المختلفة التي يمكن إرسالها عبر دارة معينة في ثانية يساوي ضعف المجال الكلي أو حزمة التواترات المستخدمة . وهكذا يتناسب عدد الاحرف المرسل مع عرض الحزمة أثبت كل من هارتلي ونيكويست أيضا أن سرعة نقل الاحرف تتناسب مع لوغاريتم عدد قيم التيار المستخدمة .

احتاجت النظرية المتكاملة للاتصالات ادوات رياضية اخرى وافكر

محدثة . وارتبط ذلك الجانب من النظرية بأعمال كولوموغروف وواينر اللذين درسا مشكلة إشارة مجهولة من نوع معين تشوشها إضافات من الضجيج . كيف يمكن ترشيح الإشارة على الرغم من وجود الضجيج ، هكذا ما أجاب عنه بالتفصيل كل من كولوموغروف وواينر .

تختلف المسألة التي ندر شانون نفسه لها عما تقدم . نفرض أن لدينا مصدر إرسال ينتج رسائل من نوع معين كالتصوص الإنكليزية مثلا . ونضيف الى ذلك فرضاً آخر مفاده أن بحوزتنا قناة اتصال ذات مواصفات محددة ولكنها مشوبة بالضجيج . فكيف يمكننا أن نمثل أو نرمز الرسائل من المصدر المرسل باستخدام الإشارات الكهربائية للحصول على أسرع إرسال ممكن عبر القناة المعتبرة ، وبشكل عملي ما هي السرعة التي نتمكن بواسطتها من إرسال رسالة معينة عبر قناة معطاة بدون أخطاء . هذا هو عرض تقريبي وعام للمسألة التي طرحها شانون على نفسه ثم قام بحلها .





## الفصل الثالث

### نموذج رياضي

إن النظرية الرياضية التي تحاول تفسير العالم والتنبؤ بأحداثه تعتبر على الدوام نموذجاً مبسطاً لهذا العالم ، لا تدخل في صلب تشكيله إلا الأشياء التي لها صلة بالظاهرة المدروسة .

وهكذا تتركب الكواكب من مواد مختلفة صلبة ، سائلة ، وغازية في ضغوط ودرجات حرارة متباينة . تعكس الأقسام من تلك المواد المعرضة لنور الشمس نسباً من الألوان المختلفة للضوء الساقط عليها وهذا يؤدي للملاحظة بقماً لونية مختلفة عندما نقوم برصد تلك الكواكب . إلا أن الفلكي الرياضي لا يحتاج كل ذلك عند حسابه لمدارات الكواكب حول الشمس وكل ما يأخذه بالاعتبار في هذه الحالة كتلة الشمس والكوكب المعتبر وبعد الكوكب عن الشمس ، وأخيراً سرعة الكوكب ووجهة حركته عند لحظة ابتدائية معينة .، وإذا رغب الفلكي بحساب أكثر دقة يدخل في حسابه كتل وحركات الكواكب التي تفرض أثراً ثقالياً على الكوكب المدروس .

لا يعني ذلك أن الفلكيين غير معنيين بالأحوال الأخرى للكواكب وكذلك بالنجوم والسدم ، إلا أن النقطة الجوهرية في الموضوع أنهم لا يحتاجون هذه الأمور لدى حسابهم مدارات الكواكب . تبرز جماليات وقوة النظرية الرياضية والنموذج الرياضي في الفصل بين ما هو هام وما هو أقل أهمية ، وهكذا يمكن الربط بين بعض الظواهر الملاحظة دون الحاجة لفهم الطبيعة بأكملها والكون بمجمل سلوكه .

تختلف النماذج الرياضية بدرجات دقتها أو امكانات تطبيقها . وهكذا يمكننا حساب مدارات الكواكب بدقة عالية باعتبارها أجساماً صلبة ، على الرغم من أنه لا توجد أجسام صلبة في الواقع . ومن جهة أخرى لا يمكن فهم الحركة المديدة لقمر الأرض إلا إذا أخذنا بالحسبان حركة كتل المياه على سطح الأرض أي حوادث المد والجزر . لذا ففي دراسة حركة القمر لا يمكن اعتبار الأرض جسماً صلباً .

ندرس وبشكل مماثل في نظرية الشبكات الخصائص الكهربائية لتوصيلات المحرّضات المثالية والكثفات والمقاومات والتي تتصف بخصائص رياضية بسيطة معينة . أما المركبات الحقيقية المستخدمة بشكل فعلي في الدارات المختلفة كالراديو والتلفزيون والهاتف وغيرها فهي تقرب الى هذا الحد أو ذاك من الموصفات الرياضية للعناصر المثالية المعتبرة في نظرية الشبكات وهي المحرّضات ، الكثفات والمقاومات ويختلف مقدار الفرق حسب الحالة ، اذ يكون ضئيلاً ويمكن اهماله في دائرة ما ، بينما يجب أخذه بالاعتبار في دائرة أخرى بمزيد من الحسابات المعمقة .

يمكن أن يكون النموذج الرياضي بالطبع تقريبياً ، وحتى تمثيلاً غير صحيح للحوادث في العالم الواقعي . لذا وقع رجال الاقتصاد الأوائل الانانيون المدفوعون بحب الربح في مطب مجانبية النماذج الرياضية لأن سلوك الاقتصاديين لم يكن مناسباً وكذلك كان فاشلاً في تفسير العلاقات الاقتصادية في العالم والناس الموجودين فيه .

لقد ضربنا مدارات الكواكب وسلوك الشبكات أمثلة عن نظم مثالية حتمية يمكن التنبؤ بسلوكها المستقبلي تماماً كما نتوقع من الآلات ، إذ يمكن للفلكيين حساب مواقع الكواكب لآلاف مقبلة من السنين ، كذلك تطلعنّا نظرية الشبكات على كل السلوك اللاحق لشبكة كهربائية عند اثرتها بإشارة كهربائية معينة .

تسحب خاصة الحتمية حتى على الاقتصاديين ، اذ ان الاقتصادي سيحركه على الدوام دافع الربح . إلا انه اذا قام مرة برمي احجار النرد ظناً منه انه المفضل عندها ، فسيصبح مستقبلة الاقتصادي على كف عفريت ولا يمكن التنبؤ به فحتى احجار النرد قد تفقد تفضيلها وتتركه عندئذ في حالة خسارة كاملة .

يمكننا على الرغم من ذلك تصميم نماذج رياضية للحوادث العشوائية كسحب عدد ما ؛ ثلاثة مثلاً ، من الكرات البيضاء أو السوداء من علبة تحتوي على العدد نفسه من كلا النوعين . يطلعا مثل هذا النموذج ، في واقع الامر ، على انه بعد عدد كافٍ من المحاولات تكون قد سحبنا كرات بيضاء وبشكل متتالٍ لمدة تساوي  $\frac{1}{2}$  الوقت ، ومزيج من كرتين بياضين وأخرى سوداء لمدة  $\frac{1}{2}$  الوقت ، ومزيج آخر من كرتين سوداوين وأخرى بيضاء لمدة  $\frac{1}{2}$  الوقت ، وأخيراً كرات سوداء وبشكل مستمر خلال  $\frac{1}{2}$  الوقت . يفيدنا هذا النموذج أيضاً في معرفة درجات الانحرافات من هذه الأرقام بعد عدد ما من عمليات السحب .

تؤكد الخبرة العملية ان السلوك الإنساني ليس حتمياً بالدرجة التي يسمى اليها الاقتصادي وهو في نفس الوقت ليس عشوائياً كرمي احجار النرد أو سحب الكرات من مزيج من الكرات السوداء والبيضاء . إلا انه يجب علينا ان نوضح ان نموذجاً حتمياً لن يذهب بنا بعيداً في تفسير مختلف ظواهر السلوك الإنساني كالاتصالات الإنسانية مثلاً ، بينما يمكن للنموذج العشوائي أو الإحصائي فعل ذلك .

نعلم جميعاً ان جداول معدلات الوفيات المستخدمة من قبل شركات التأمين تعطي تنبؤات معقولة فيما يتعلق بنسبة الوفيات المقبلة في مجموعة تضم عدداً كبيراً من المسنين ، هذا على الرغم من صعوبة التنبؤ بموت شخص معين وهكذا يمكننا النموذج الإحصائي من فهم السلوك الإنساني بل وحتى من اجراء بعض التنبؤات الخاصة بذلك السلوك تماماً كما نتنبأ على المدى البعيد وبشكل وسطي بعدد المرات التي سنسحب بها ثلاثة كرات سوداء بمحض المصادفة من مزيج متساوٍ من الكرات البيضاء والسوداء .

قد يعترض البعض بحجة ان جداول معدلات الوفيات تغطي التنبؤات الخاصة بمجموعات من الناس ولا تغطي التنبؤات الخاصة بالأفراد ، إلا ان الخبرة تعلمنا ان باستطاعتنا اجراء التنبؤات الخاصة بالأفراد على قدم المساواة مع التنبؤات الخاصة بالمجموعات . وهكذا إذا عددنا تواتر استخدام الحرف E في النصوص الإنكليزية نجد ان نسبة مرات وروده تساوي ١٣ ٪ بالمقارنة مع الأحرف الأخرى ، يقابل هذا الرقم في حالة الحرف W ٢ ٪ فقط . ولكننا نجد أيضاً نفس نسب الورد للحرفين E, W في نص كتبه أي شخص من الأشخاص . يمكننا أن نتنبأ استناداً الى ذلك شيء من الثقة أنه إذا كتب أي منا رسالة طويلة جداً او كتباً باللغة الإنكليزية فسيتواتر الحرف E بنسبة ١٣ ٪ فيما كتبه .

لا يعد إمكان التنبؤ بسلوك ما حريتنا أكثر مما تحددها اية مادة أخرى . لا يتوجب على أي منا اثناء الكتابة إيراد نفس النسب لكل الأحرف كما يوردها شخص آخر . لقد خرج كثيرون من الأشخاص المتميزين عن النموذج الشائع . قام ويليام . ف. فرايدمان المشهور بدراسة الأمور المستعصية ومؤلف كتاب ( حل رموز شكسبير ) بتزويدي بالأمثلة التالية :

كتب الشاعر الألماني غوتلوب بورمان ( ١٧٣٧ - ١٨٠٥ ) ١٣٠ بيت شعر تضمنت ٢٠٠٠٠ كلمة خلت جميعها من الحرف R وذهب هذا الشاعر الى أكثر من ذلك بحذفه الحرف R من كل الجمل التي استعملها للحوار في حياته العادية خلال ال ١٧ سنة الأخيرة من حياته .

نشر القاص البرتغالي الوتسو آلكالاهيرارا خمس قصص في لشبونة عام ١٦٤١ لم يستخدم فيها أحد الأحرف الصوتية . وقد أورد أمثلة مشابهة كل من الأشخاص التالية أسماؤهم : فرانسيسكونا فلريت ريبيرا ( ١٦٥٩ ) ، فرناندو جاسينتودي زوريتاهارو ( ١٦٥٤ ) ، وامانويل لورانزو ليزارازو بربويزانا ( ١٦٥٤ ) .



نشر ارنست فنسنت رايت رواية من ٢٦٧ صفحة لم يستخدم فيها الحرف E مطلقا . ولئن كانت هذه الممارسات الإرادية تدل على عدم استحالة كسر سلاسل المألوف ، إلا أننا عندما نكتب فإننا نفضل الطريقة الاتباعية المتداولة ، وهكذا فعندما لا نرغب بالخروج عن طريقنا بهدف اثبات أن بالإمكان أن نفعل خلاف ما تقدم فإننا نورد الحرف E في كتابتنا الإنكليزية بنسبة ١٣ ٪ تماما بكل ما في آلة معينة من كفاءة أو كتطبيق قانون رياضي .

لا نستطيع الانتقال من هذه الفكرة الى الفكرة العاكسة المتضمنة أن بإمكان الآلة التي تزرع فيها نفس العادات كتابة نصوص انكليزية إلا أن شأنون أوضح كيفية تقريب الكلمات والنصوص الإنكليزية بعمليات رياضية يمكن تنفيذها من قبل آلة معينة .

نفرض على سبيل المثال أن كل ما نستطيع فعله هو انتاج سلاسل من الاحرف والفراغات باحتمالات متساوية . ويمكن تنفيذ ذلك على الصميد العملي بكتابة كل حرف على نفس العدد من البطاقات المتماثلة وكذلك تخصيص عدد مماثل من البطاقات دون كتابة لتمثيل الفراغ ، و أخيراً وضع الجميع في جعبة ثم سحب احداها واستخدام رمزها سواء كان حرفاً أم فراغاً. ثم اعادته فخلط البطاقات من أخرى وسحب واحدة لاستخدام رمزها وهكذا . ينتج عن هذا التطبيق ما يلي :

١ - التقريب الصغري ( الرموز مستقلة ومتساوية الاحتمال )  
 XFOML RXIKHRJFFJUJ ZLPWCFWKCYJ  
 FFJEYVKCSSGHYD QPAAMKBZAACIBZLHJQD

يتواتر هنا حرفا الـ Z و W بكثرة ، بينما عدد الفراغات قليل وكذلك عدد مرات ورود الحرف E . يمكننا ان نقترح أكثر من اللغة الانكليزية باختيار الاحرف بشكل مستقل عن بعضها البعض ولكن باختيار الحرف E مرات أكثر من اختيار الحرفين Z و W . وينفذ ذلك بزيادة عدد البطاقات الخاصة بالحرف E واقلال البطاقات الخاصة

بالحرفين W الحرف ومن ثم تكرار نفس الطريقة السابقة في استخراج البطاقات واستخدام رموزها . ولما كان احتمال ان يكون أحد الحرف E هو ١٣. نضع في الجعبة ١٣ بطاقة خاصة بهذا الحرف وبالمثل نضع بطاقتين فقط للحرف W لان الاحتمال المقابل للحرف الاخير هو ٢. وهكذا بالنسبة لبقية الحرف . ندرج فيما يلي نتائج هذه التجربة والتي دعاهما شاتون بالتقريب الاول لنصوص اللغة الانكليزية .

٢ - التقريب الاول ( الرموز مستقلة ولكن تساوي تواتراتها مايرد في النصوص الانكليزية ) .

OCRO HLI RGWR NMIELWIS EU LL NBNSEBAYI TH  
FEI ALHENHITPA OOBITVA NAH BRL

لا نجد في النصوص الانكليزية اي زوج من الحرف يبدأ بالحرف Q الا الزوج QU ، وهكذا فاحتمال ان تصادف زوجاً مثل QX هو صفر وكذا احتمال مصادفة الزوج QZ وعلى الرغم من كون احتمال ورود الزوج QU اكبر من الصفر فهو احتمال صغير للغاية ، في حين ان احتمال الزوج OR هو ٣٧٪ والزوج TH ١٪ والزوج WE ٦٪ . تحمل هذه الاحتمالات المعنى التالي . اذا احتوى نص مكتوب على عدد من الحرف مساوي مثلاً ١٠٠٠١ حرفاً فان في هذا النص ١٠٠٠ زوج متتالي من الحرف وهي : الحروف الاول والثاني ، الثاني والثالث ، الثالث والرابع ، وهكذا حتى الزوج المكون من الحرف ما قبل الاخير والحرف الاخير . نعتبر الزوج T H بونعد مرات وروده ، حيث يمكن ان يكون العدد الناتج (٣٧٠) . فاذا قسمنا عدد مرات ورود الزوج TH والذي فرضناه مساوياً ٣٧٠ على عدد كل الأزواج الموجودة والمساوي في مثالنا ١٠٠٠ لحصلنا على عدد هو ٣٧٪ وهو احتمال ان نحصل على الزوج TH اذا رفعنا من ذلك النص وبشكل عشوائي زوجاً ما من الحرف .

اعد بعض المحللين البارمين للشفيرات جدولاً تتضمن احتمالات

مماثلة لورود أزواج مختلفة من الاحرف في نصوص اللغة الانكليزية .  
نفرض أن لدينا ٢٧ جمعة ، نخصص ٢٦ منها للأزواج التي تبدأ بكل  
حرف من حروف اللغة الانكليزية ، بينما الجمعة الاخيرة نخصصها للأزواج  
التي تبدأ بفراغات . نضع بعد ذلك عدداً كبيراً من الأزواج في الجعب  
بشكل يناسب احتمالات تلك الأزواج ، فمثلاً من أصل ١٠٠٠ (زوج ،  
نضع ٣٧ زوج من نوع TH ، ١٠ من نوع WE وهكذا .

دعونا نتوقف للحظة في محاولة فهم معنى هذه الجعب المليئة بالأزواج .  
بدلالة عمليات التعداد الاصلية التي أدت لتكوين احتمالات تلك الأزواج .

يمكننا متابعة كل ورود للحرف T في النص اذا نحن جردناه حرفاً  
بحرف ، وهكذا سيكون عدد الأزواج البادئة بالحرف T ، والتي نضعها  
جميعاً في جمعة واحدة ، مساوٍ لعدد مرات ورود الحرف T . وتساوي  
نسبة عدد هذه الأزواج الى عدد كل الأزواج الواردة في النص ، احتمال  
ورود الحرف T في النص أي ١٠ ٪ ، نرسم لهذا الاحتمال بالرمز :  
$$P(T) = 10\%$$

نلاحظ هنا ان هذه النسبة هي أيضاً نسبة الأزواج المنتهية بالحرف  
T كما هي نسبة الأزواج البادئة به .

وبالعودة الى نصنا المثال المحتوي على ١٠٠٠١ حرفاً و ١٠٠٠٠  
زوجاً ، فان عدد مرات ورود الزوج TH هو ٣٧٠ ، وهكذا فاحتمال  
هو ٣٧ ٪ ، نرسم لهذا الاحتمال بالرمز TH مصادفة الزوج  
ح (H, T) ويكون : ح (H, T) = ٣٧ ٪

نجد حسب مثالنا أن الأزواج البادئة بالحرف T والموضوعة في  
جمعة واحدة تساوي ١٠٠٠ زوج لان احتمالها هو ١٠ ٪ ، ومن أصل  
هذه الأزواج يوجد ٣٧٠ زوج من نوع TH . وهكذا يكون نسبة الأزواج  
TH مساوية لـ : 
$$\frac{370}{1000} = 37\%$$
 نقول حسب ما تقدم ان احتمال

كون الزوج البادئ بالحرف T ( وهو الاحتمال الذي هو الزوج TH  
نرسم له بالرمز ح (H) ، يساوي : 
$$P(H) = 37\%$$

يدعى هذا بالاحتمال المشروط بكون الحرف التالي للحرف T  
هو الحرف H .

يمكننا أن نستخدم هذه الاحتمالات المثلة بشكل كافٍ بعدد الأزواج  
المختلفة في الجعب المختلفة لإنشاء نص انكليزي تتواتر فيه الاحرف  
والازواج تواترها في النصوص الطبيعية . نبين فيما يلي طريقة إنشاء  
هذا النص : نسحب من جعبة ما زوجاً ونكتب حرفيه ثم نسحب زوجاً  
آخر من الجعبة المخصصة للازواج البادئة بالحرف الثاني من الزوج الاول  
المسحوب ونكتب الحرف الثاني من هذا الزوج الثاني المسحوب . نسحب  
الآن زوجاً ثالثاً من الجعبة المخصصة للازواج البادئة بالحرف الثاني  
من الزوج الثاني المسحوب ونكتب الحرف الثاني من هذا الزوج الثالث  
المسحوب ، ونستمر بهذه العملية وفق نفس الوتيرة ، كما نعامل الفراغ  
كالحرف تماماً . هناك احتمال خاص أن يلي الفراغ أحد الاحرف ( انتهاء  
كلمة ما ) وكذا احتمال خاص آخر أن يلي أحد الاحرف فراغ ما ( بدء  
كلمة ما ) ..

انشأ شانون مادامه بالتقريب الثاني للنصوص الانكليزية لدى  
هذه الطريقة .

٣ - التقريب الثاني ( إنشاء الأزواج كما في النصوص الطبيعية  
الانكليزية )

ON IE ANT SOUTINYS ARE T INCTORE ST BE S  
DEAMY ACHIN D ILONASIVE TUCOOWE AT  
TEASONARE FUSO TIZIN ADY TOBE  
SEACE CTISBE

أبدع بعض الباحثين فكرة استقصاء ورود التراكيب الثلاثية الاحرف  
وحسبوا بالمثل احتمالاتها . استخدم شانون هذه الاحتمالات أيضاً  
لإنشاء مادامه بالتقريب الثالث للنصوص الانكليزية .

٤ - التقريب الثالث « انشاء التراكيب الثلاثية كما في النصوص الطبيعية الانكليزية )

IN NO IST LAT WHEY CRATICT FROURE BIRS  
GROCID PONDENOME OF DEMONSTURES OF THE  
REPTAGIN IS REGOACTONA OF CRE

نلاحظ لدى العودة الى تقريبات شانون الاربعة اعلاه تشابهاً مطرداً مع النصوص الانكليزية الطبيعية . لا نجد في التقريب الاول وهو التقريب الذي يأخذ تواترات الاحرف بعين اعتبار ، التراكيبين OCRO و NAH وهما يشبهان نوعاً ما الكلمات الانكليزية . ولدى الانتقال الى التقريب الثاني الذي يأخذ تواترات الأزواج بعين الاعتبار نجد ان كل التراكيب فيه يمكن نطقها ، كما ان التراكيب ANDY AT BE ARE ON ترد في اللغة الانكليزية . واخيراً في التقريب الثالث الذي يعتبر تواتر ورود التراكيب الثلاثية نجد ثمانية كلمات من اللغة الانكليزية ، وعدة كلمات اخرى يطابق منطوقها منطوق الكلمات الانكليزية مثل :

DEMONSTURES PONDENOME GROCID

قام ج. ت. جيلبود بعمل مشابه ولكن في اللغة اللاتينية بدلاً من الانكليزية واستخدم التراكيب الثلاثية وتوصل الى نتائج مماثلة تقتطف منها التراكيب التالية :

IBUS CENT IPITIA VETIS IPSE CUM  
VIVIVS SE ACETITI DEDENTUR

ونجد من بين هذه التراكيب الكلمات اللاتينية الاصلية التالية :

IPSE CUM SE

يتضح من هذه الامثلة اننا اذا اعطينا الآلة احصائيات حول لغة معينة وكذلك احتمالات ايجاد حرف معين او زمر مؤلفة من حرف او اثنين

أو ثلاثة أو أكثر ، بلغطاء الآلة أيضاً إمكانية شبيهة بسحب كرة من جعبة أو قذف قطعة نقد أو اختيار رقم عشوائي فيمكننا جعل الآلة تنتج نصوصاً أكثر قرباً من النصوص الطبيعية للغة المعتمدة . وكلما كانت المعلومات المعطاة للآلة أكثر كمالات كانت النصوص المصاغة من قبلها شبيهة بالنصوص الطبيعية سواء بمبناها الإحصائي أو بالنسبة للعين الإنسانية .

إذا جعلنا الآلة تختار زمراً من ثلاثة أحرف بالاستناد إلى احتمالاتها فإن أي تركيب ثلاثي تقدمه الآلة سيكون كلمة معروفة من اللغة أو جزءاً من كلمة معروفة وأي تركيب مثني تقدمه في هذه الحالة سيكون كلمة معروفة أن الآلة على كل حال أكثر انطلاقاً من الإنسان الذي يحدد نفسه عادة بكتابة سلاسل من الأحرف منتقاة بحيث تحمل معاني معينة وهكذا يتجاوز الكثير من التركيبات التي أوردناها في التقريبات السابقة . يمكن بالطبع للإنسان ومن حيث المبدأ أن يكتب مثل هذه التراكيب إلا أنه لا يفعل ذلك عادة .

يمكننا تحرير الآلة من عيب تقديم تراكيب الأحرف غير المعروفة في اللغة بجعلها ، أي الآلة ، تختار من بين التراكيب التي يحتوي كل منها على عدد من الأحرف يساوي ما تحويه أطول كلمة معروفة في اللغة . نستطيع تحقيق الهدف ذاته بطريقة أبسط إذا جهزنا الآلة بالكلمات عوضاً عن الأحرف وتراكيبها ثم طلبنا منها تقديم الكلمات وفق احتمالات مناسبة .

قدم شانون مثلاً تم اختيار الكلمات فيه بشكل مستقل ولكن بحسب احتمالات ورودها في النصوص الانكليزية ، مثلاً ترد كلمات THE AND MAN وغيرها بنفس تواتر ورودها في النصوص الطبيعية الانكليزية . ولتحقيق هذا المثال نختار نصاً ما ، ثم نكتب كل كلمة وأردة فيه وبشكل منفصل على بطاقة ، نضع البطاقات في جعبة ونخلطها ثم نبدأ بسحب البطاقات واحدة تلو الأخرى ونكتب الكلمات المقابلة وفق ترتيب السحب . يسمى شانون هذه العملية بتقريب الكلمات الأول . وقد حصل في مثال عالجه على ما يلي :

٥ - تقريب الكلمات الاول : تسحب الكلمات هنا بشكل مستقل ولكن وفق توابعاتها المناسبة .

REPRESENTING AND SPEEDILY IS AN GOOD APT  
OR CAN COME DIFFERENT NATURAL HERE HE  
THE A IN COME THE TO OF TO EXPERT  
GRAY COME TO FURNISHES THE LINE  
MESSAGE HAD BE THYSE

لا توجد جداول لاحتمالات ورود ازواج الكلمات في اللغة الانكليزية ، الا ان شانون اثبتا مقطعا عشوائيا كانت فيه احتمالات ورود ازواج الكلمات مساوية لما يمكن ان تكون عليه في مقطع طبيعي . بدأ شانون باختيار زوج من الكلمات من رواية معينة وبشكل عشوائي ، ثم نسخ الكلمة الثابتة من هذا الزوج على ورقة منفصلة ، بحث بعد ذلك في نفس الرواية عن الورد التالي للكلمة الثانية من الزوج الاول ، ونسخ الكلمة الواقعة بعد هذا الورد على الورقة المنفصلة ، ثم بحث عن الورد التالي لهذه الكلمة الاخيرة ونسخ الكلمة التالية لهذا الورد وهكذا . أدت هذه العملية بشانون الى ما اسماه تقريب الكلمات الثاني .

٦ - تقريب الكلمات الثاني : حيث احتمالات تتالي الكلمات صحيحة ولا تستخدم قواعد الانشاء أبعد من ذلك .

دعونا نعمن النظر في كل ما وجدناه . ترد في النصوص اللغوية

THE HEAD AND IN FRONTAL ATTACK ON AN  
ENGLISH WRITER THAT THE CHARACTER OF  
THIS POINT IS THEREFORE ANOTHER METHOD  
FOR THE LETTERS THAT THE TIME OF WHO  
EVER TOLD THE PROBLEM FOR AN  
UNEXPECTED.

نلاحظ في هذا النص تشكيلات من الكلمات الانكليزية تشابه ، بل وقد تطابق أحيانا ، ما يرد في نص طبيعي .

دعونا نعمن النظر في كل ما وجدناه . ترد في النصوص اللغوية الحقيقية ، تلك النصوص التي نرسلها عبر لوحة جهاز البرق مثلاً ، حروف معينة بتواترات ثابتة تقريباً . تتكرر تراكيب الأحرف الثنائية والثلاثية والرابعة بتواترات ثابتة تقريباً أيضاً خاصة كلما ازداد طول النص المعتبر . كذا ترد الكلمات وأزواج الكلمات بتواترات ثابتة . وأخيراً يمكننا إنتاج سلاسل من الكلمات أو الأحرف تمكس هذه المواصفات الاحصائية اذا جعلنا - آلة مثلاً - تتصدى للأمر باستخدام طرائق رياضية عشوائية .

لن نستطيع هذه الطريقة ، مهما طرأ عليها من تحسينات ، أن تنتج كل سلاسل الكلمات التي يمكن للإنسان أن يتفوه بها ، وأن دفعها حتى نهايتها القصوى لن يخرج بها عن تراكيب جمالية وردت سابقاً والآن لما حملت المعلومات الاحصائية التي قامت عليها أصلاً . ومع ذلك فقد تشكل جملة لم تقل أبداً من قبل .

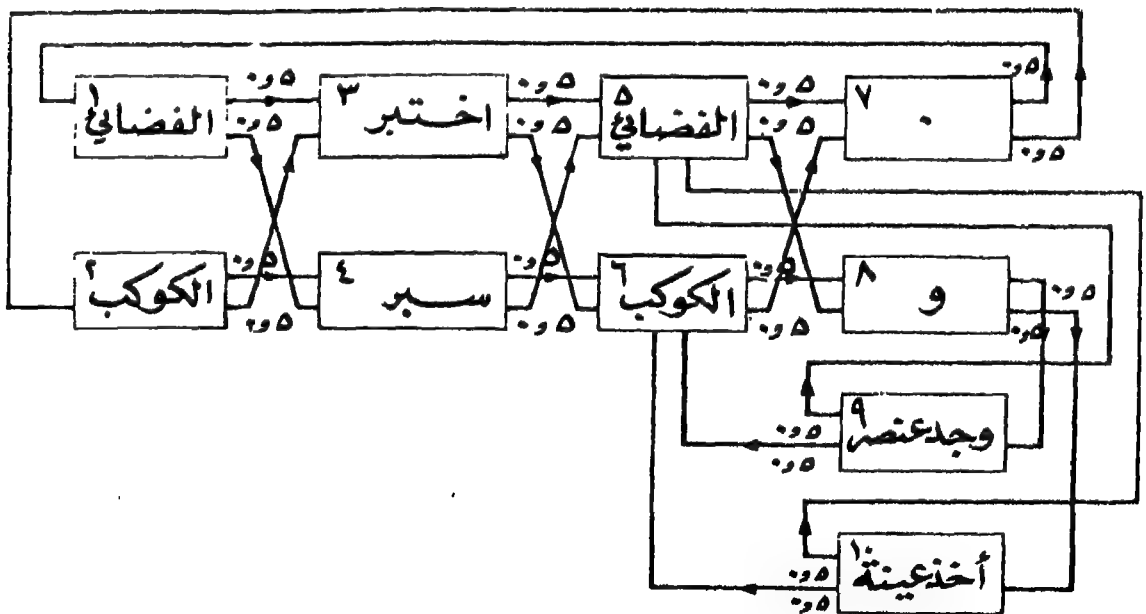
لا تقتصر أحكام اللغة على الأحرف والكلمات فقط ، بل تمتد لها إلى أصناف من الكلمات وقواعد ربطها ، أي إلى قواعد اللغة . يتوجب في هذا المعرض على اللغويين والمهندسين الذين يحاولون بناء آلات مترجمة أن يفحصوا في القواعد ، بحيث تتمكن الآلاتهم من ( توليف الكلمات في تشكيلات صحيحة من وجهة نظر القواعد ، حتى ولو لم ترد هذه التشكيلات في النصوص اللغوية سابقاً ) ، وعلى الآلات أيضاً أن تفهم معاني الكلمات الواردة في النص المترجم من سياق ذلك النص . إن هذه مشكلة كبيرة ومعقدة جداً . أما تحقيق آلة قادرة على إنتاج تشكيلات لا نهاية لعددتها من الجمل الصحيحة بالنسبة للقواعد ، ولكن غير المفيدة في أكثر الأحوال ، فهو أمر بسيط فعلاً .

يوضح الشكل ٣ - ١ آلة من هذا الطراز . يمثل كل مستطيل مرقم حالة من حالات هذه الآلة . تدعى هذه الآلة بالآلة منتهية الحالات ، لأن عدد مستطيلاتها أو حالاتها منته .



ينطلق من كل مستطيل عدد من الاسهم الى المستطيلات الاخرى ،  
يساوي هذا العدد في آلتنا الخاصة هذه اثنين ، اذ ينطلق سهمان فقط  
من كل مستطيل الى مستطيلين آخرين . كذلك فقد تم ارفاق كل سهم  
في هذه الآلة بالعدد ١ ويعني هذا العدد ن احتمال انتقال الآلة مثلا من  
الحالة ٢ الى ٣ هو ١ ، كذلك احتمال انتقالها من الحالة ٢ الى الحالة  
٤ هو ١ ايضا .

كيف نشغل هذه الآلة ؟ الامر بسيط فكل ما نحتاجه هو سلسلة من  
الخيارات العشوائية والتي يمكن الحصول عليها مثلا برمي قطعة نقد  
( مرة بعد مرة ، ونصطلح على ان ( الطرة ) تعني اتباع السهم العلوي  
بينما ( النقص ) يعني اتباع السهم السفلي ويفضي كل من السهمين الى  
حالة جديدة من حالات الآلة . وعندما نبلغ حالة جديدة للآلة ننسخ  
الكلمة او الكلمات او الرموز الواردة في المستطيل المحدد ثم ( نرمي قطعة  
النقد مرة اخرى بهدف الانتقال الى حالة جديدة وهكذا .



الشكل ٢ - ١





يقترح الرياضي ، بهدف الالتفاف حول هذه النقطة ، اعتبار أكثر من سلسلة من الاحرف يمكن للمصدر انتاجها . فالتنا في كل الاحوال آلة تخيلية ، لذا نستطيع ان نتخيل وبمنتهى البساطة انها اقلعت عددا غير منته من المرات منتجة بذلك عدد غير منته من سلاسل الاحرف . يسمى هذا العدد الغير منتهى من السلاسل بمجموعة السلاسل .

نستطيع بدء هذه السلاسل باي طريقة نشاء ، فمثلا في حالة مصدر لاوزاج الاحرف ، يمكننا اذا شئنا بدء ( نسبة من السلاسل قدرها  $1/3$  بحرف E ( هذا هو احتمال ورود الحرف E في النصوص الانكليزية ) ، وبدء نسبة أخرى من السلاسل نسبتها  $2/3$  بحرف W (احتمال الحرف W ) وهكذا . اذا نفذنا ذلك وحسبنا متوسط عدد السلاسل التي يرد الحرف E في مطلع كل منها ( وهو  $1/3$  بالطبع ) وكذلك متوسط عدد السلاسل التي يرد الحرف Z في الموقع الثالث من كل منها وهكذا ، لوجدنا ان هذا المتوسط سيساوي على الدوام  $1/3$  ينطبق هذا الامر على اي موقع نختاره في السلسلة وعلى اي حرف آخر غير حرف E ، اذ سيكون على الدوام متوسط عدد السلاسل التي يرد الحرف المعبر فيها في موقع معين مساويا لاحتمال ذلك الحرف . ينسحب هذا ايضا على الازواج ، فمتوسط عدد السلاسل التي يرد فيها زوج مثل TH أو WE في موقع معين من كل سلسلة لا علاقة له بالموقع المعبر .

هذا ما نعنيه بمصطلح السكونية اذا ربطنا احتمالات معينة بشروط البدء الخاصة بانشاء مجموعة من سلاسل الاحرف التي يقدمها مصدر توليد للاحرف واذا قمنا بعد ذلك باجراء أية عملية احصائية عند موقع معين من كل سلسلة . وكانت متوسطات الاحتمالات المحسوبة بالاستناد الى هذه العملية مستقلة عن الموقع الذي جرت عنده العملية الاحصائية ، كان المصدر في هذه الحالة سكونيا . يبدو هذا التعريف غامضا او صعبا بالنسبة للقارئ ، الا ان الصعوبة تبرز عند محاولة اعطاء شكل رياضي دقيق ومفيد لفكرة قد تظهر من جهة أخرى عديمة الفائدة رياضيا .

اعتبرنا في مناقشاتنا السابقة لدى دراستنا مجموعة السلاسل الغير منتهية التي يولدها مصدر معين ، المتوسطات عبر كل الاحرف الواردة في الموقع الاول من كل سلسلة ثم عبر كل الاحرف الواردة في الموقع الثاني من كل سلسلة ثم في الموقع الثالث وهكذا وكررنا العمل بعد ذلك بحساب المتوسطات عبر كل الثنائيات الواردة في مواقع مناظرة ثم الثلاثيات وهكذا تباعا . يدعى المتوسط المترتب على مثل هذه الحسابات بمتوسط المجموعة وهو يختلف عن متوسط آخر كنا قد تعرضنا له سابقا في هذا الفصل حيث قمنا بخلط كل الاحرف الواردة في سلسلة واحدة فقط واخذنا المتوسط عبر هذا الخليط ، يدعى مثل هذا المتوسط الاخير بالمتوسط الزمني .

يمكن للمتوسطين الانفي الذكر ان يكونا مختلفين . نفرض على سبيل المثال مصدرا يعطي في ثلث عدد مرات اقلاعه الحرف A ويصدر بعد كل من هذه الاقلاعات الحرفين A B بالتناوب وفي الثلث الثاني يعطي الحرف B ثم الحرفين A B بالتناوب ، اما في الثلث الثالث فلا يعطي الا الحرف A . تكون السلاسل الممكنة وفق ذلك :

A B A B A B .....  
B A B A B A .....  
E E E E E E .....

يتضح بشكل مباشر ان هذا المصدر سكوني ونسدرج في الجدول التالي الاحتمالات الخاصة به .

احتمال	المتوسط الزمني السلسلة الاولى	المتوسط الزمني السلسلة الثانية	المتوسط الزمني السلسلة الثالثة	متوسط المجموعة
الحرف				
A	↓	↓	•	↓
B	↓	↓	•	↓
E	•	•	1	↓

إذا كان المصدر ساكناً وكان كل متوسط مجموعي ممكن ( للاحرف ، الأزواج ، الثلاثيات وغيرها ) مساوياً للمتوسط الزمني المقابل ، دمي المصدر في هذه الحالة مصدراً مستقراً . تنطبق النظريات البرهنة في الفصول المقبلة والمتعلقة بنظرية المعلومات على المصادر المستقرة وتستند براهينها الى افتراض ان مصدر الارسال هو مصدر مستقر . لقد جرى تقدم لا بأس به في مجال ترميز المصادر غير الساكنة الا اننا لن نتعرض لها في هذا الكتاب .

تتناول نظرية المعلومات المصادر المنعزلة التي تولد سلاسل من الاحرف وقد عرضنا لها للتو ، والى جانب ذلك تعنى نظرية المعلومات بالمصادر المستمرة التي تصدر اشارات متغيرة مستمرة كأمواج التخاطب الصوتية او التيارات الكهربائية المتغيرة المستخدمة في الهاتف . ان هذه المصادر هي من النوع المستقر .

لماذا يشكل المصدر المستقر نموذجاً رياضياً ملائماً ومثمراً لدى تطبيقه؟ ان لم يكن لسبب فلاننا نرى بالعودة الى تعريف المصدر المستقر . ان الاحصائيات الخاصة برسالة مثلاً تبرز تواتر حرف معين كالخرف E أو زوج مثل TH أو تركيب ثلاثي أو غيره ، كل هذه الاحصائيات لا تتغير على طول الرسالة ، وكلما ذهبنا أبعد بالرسالة نحصل على تقديرات أجود لاحتتمالات ورود الاحرف المختلفة وزمرها . وبكلمات أوضح : اذا اخترنا مقاطع أطول وأطول من الرسالة فتوصل وعلى الدوام لتوصيف رياضي للمصدر أجود وأجود .

ان الاحتمالات وتوصيف المصدر التي نحصل عليها وفق ما تقدم تنطبق على كل الرسائل التي يولدها المصدر وليس على الرسالة المختبرة فقط ، وسبب ذلك هو تساوي متوسط المجموعة والمتوسط الزمني .

وهكذا فالمصدر المستقر هو نوع خاص وبسيط من مصادر الرسائل الاحتمالية او العشوائية ، والعمليات البسيطة اسهل من منظور التناول

الرياضي بالمقارنة مع نظائرها المعقدة . الا ان البساطة بحد ذاتها لا تكفي فالمصدر المستقر لا يمكن ان يكون موضع اهتمام في نظرية الاتصالات اذا لم يكن واقعياً بدرجة كافية الى جانب بساطته .

يتضح في نظرية الاتصالات جانبين ، يتصف الاول بالدقة الرياضية البالغة ويعالج المصادر المستقرة الافتراضية والتي نتخيل ان بإمكانها اصدار مجموعات لا نهاية لها من سلاسل تحتوي كل منها على عدد لا نهاية له من الرموز . ولنا حرية الخيار كاملة فيما يتعلق اما بدراسة المصدر بحد ذاته أو اختبار المجموعات اللانهائية من الرسائل التي بإمكانه ان يولدها .

نستخدم النظريات المدرجة في نظرية الاتصالات لتغطية المشاكل المتعلقة بارسال النصوص اللغوية الحقيقية . ليس الكائن الانساني آلة رياضية افتراضية فهو لا يستطيع انتاج حتى سلسلة واحدة لا نهائية من الاحرف ناهيك عن عدد لا نهاية له من المجموعات تحتوي كل منها على عدد لا نهاية له من هذه السلاسل ..

الا ان الانسان لا يستطيع انتاج سلاسل بالغة الطول من الاحرف ، ويقدم كل الكتاب مجموعات كبيرة من هذه السلاسل الطويلة . يشكل جزء من هذا الخرج الهائل من السلاسل البالغة الطول الرسائل التي ترسل فعلاً عبر لوحة البرق .

وهكذا سنفترض ان مجموع كل الذين يبرقون هو بحد ذاته مصدر مستقر للرسائل البرقية ، وكذا مجموع كل الذين يتخاطبون عبر الهاتف هو مصدر مستقر للاشارات الهاتفية . ان مثل هذه الافتراضات تقريبية بدرجة كافية وهي قابلة للتطبيق لدى من يتكلمون لغة واحدة ، اذ لا يمكن ان نعتبر كمصدر مستقر مجموع من يستخدمون اللغتين العربية والانكليزية فالخرج المرتبط بكل من هاتين اللغتين له احتمالات وحساباته الاحصائية الخاصة وهي تختلف بشكل جذري عن احتمالات وحسابات الفئة الأخرى

لا يمكننا ان نؤكد ان مجموع الكتاب هو مصدر مستقر للرسائل وفق المعنى الدقيق لهذا المصطلح . اذ تختلف الاحصائيات اللغوية نوعاً ما باختلاف موضوع النصوص وهدفها ، كما ان اسلوب الانشاء يختلف من شخص لآخر .

نلاحظ ما يشابه ذلك في حالة التخاطب عبر الهاتف فبعض الناس يتحدثون بنعومة وبعضهم بخشونة ، بينما يقتصر البعض الآخر على اللهجة الخشنة في حالة الغضب فقط . وكل ما نستطيع تأكيده في هذه المجالات اننا تجانساً ملحوظاً في احصائيات الرسائل كحالة احتمال ورود الحرف e في عينات مختلفة من النصوص الانكليزية .

يجب ان نتذكر على الدوام الفارق الهام بين المصدر المستقر النظري وفق النظرية الرياضية للاتصالات ومصدر الرسائل المستقر التقريبي في العالم الواقعي لذا علينا ان نفرض تحفظات معقولة لدى تطبيقنا خلاصة النظرية الرياضية للاتصالات على المسائل العملية . ولا شك ان كلاً منا قد تعود ذلك في مجالات أخرى ، فمثلاً تؤكد لنا الرياضيات ان بإمكاننا تحديد مركز الدائرة بدقة اذا اعطينا ثلاثة نقاط منها ، الا انه لا يوجد انسان عاقل يفكر بإمكان تحديد مركز دائرة مرسومة للتو على قطعة من الورق وفاقدة بعض معالمها بان يلجأ مثلاً الى ثلاثة نقاط على محيط هذه الدائرة تبعد عن بعضها البعض بأقل من جزء من ألف جزء من السنتيمتر وكل ما يمكن ان يفعله في هذه الحالة هو استخدام بدايته للحصول على تحديد امثل لموقع المركز ومن ثم قياس البعد بين هذا المركز ونقطة واضحة من محيط الدائرة . اوردنا هذا المثال لتبيان نوع الحكم والتحفظ الذي يستخدم عادة عند تطبيق نظرية رياضية دقيقة على حالة عملية .

ومهما كان من أمر تحفظاتنا فان تساؤلات فلسفية تطرح نفسها سيما واننا قد استخدمنا نموذجاً رياضياً احتماليا عشوائياً لتمثيل الانسان كمصدر للرسائل . هل يعني ما فعلناه ان الانسان يتصرف بشكل عشوائي ، ان الامر ليس بهذه البساطة ، وربما لو استطعنا معرفة المزيد



عن الانسان ومحيطه وتاريخه لتمكنا على الدوام من التنبؤ بالكلمة التالية التي سينطقها أو سيكتبها انسان معين .

نفرض في نظرية الاتصالات اننا نحصل معرفتنا عن مصدر الارسال اما من الرسائل التي يولدها هذا المصدر أو ربما من دراسة غير متكاملة للانسان بحد ذاته . وبلاستناد الى ذلك يمكن أن نظفر ببعض المعلومات الاحصائية التي تساعد في زيادة احتمال معرفة ما يمكن ان تكون عليه الكلمة التالية من رسالة معينة . يبقى هناك عنصرا من الرتبة . يتصرف مصدر الرسائل بالنسبة لنا كما لو أن خيارات معينة كانت تجري بشكل عشوائي ذلك لاننا لا نملك معرفة كاملة بهذا المصدر وهكذا لا يمكننا التنبؤ عما ستكون عليه هذه الخيارات . ولو كان بإمكاننا التنبؤ بها اذن لوظفنا معارفنا لسبر غور المعلومات الاحصائية الخاصة بالمصدر . ولو استطعنا تحصيل كم اكبر من المعلومات لكان من الممكن ان نضع يدنا على حقيقة أن تلك الخيارات ليست عشوائية في واقعها بمعنى أنه يمكن التنبؤ بها ( وذلك بالاستناد الى المعلومات التي ليست بحوزتنا ) .

نستنتج الآن ان ما عرفناه عن الآلات المتناهية الحالات كذلك في الشكل ٣ - ١ كان محدودا فعلا ، فلتلك الآلات دخلها وخرجها ، والانتقال من إحدى حالاتها الى حالة أخرى لا يجب وبالضرورة أن يتم من خلال خيار عشوائي ، اذ أن مثل هذا الانتقال قد يقرر أو على الأقل يتأثر بمختلف اشكال الدخول لتلك الآلة . وعلى سبيل المثال ، يتقرر عمل الحاسب الالكتروني ، وهو آلة متناهية الحالات ، بالبرنامج والمعلومات التي يفديه بها المبرمج .

يبدو أمراً طبيعياً أن نفترض الانسان على أنه آلة متناهية الحالات ليس فقط بسبب كونه مصدراً للرسائل يولد الكلمات ، بل في كل جوانب سلوكه الأخرى . نستطيع ان نتصور اذا شئنا أن كل حالات وتشكيلات الخلايا العصبية انما هي حالات الآلة موضوع البحث ( حالات الدماغ ، ربما ) . واذا ذهبنا ابعد من ذلك فتصورنا الانتقال من حالة

لاخرى ، احيانا من طريق اصدار كلمة ، حرف ، أو صوت أو جزء من صوت ، وفي احيان اخرى من طريق القيام بفعل ما أو جزء من فعل . وهكذا يكون النظر والسمع واللمس وغيرها من الحواس اشكال مختلفة للدخل تقرر أو تؤثر في الحالة التالية التي ستنقل اليها الآلة . إذا كان الانسان آلة متناهية الحالات فعلا ، فعدد حالاته سيتجاوز وبشكل خيالي اي امكانية للاحاطة الرياضية بها . الا أن تشكيلات جزئيات الغازات تشابه هذا الوضع الى حد كبير ، ورغم ذلك نستطيع رصد تصرفات الغاز بمعرفة ضغطه وحرارته فقط .

هل سنتمكن في احد الايام من معرفة العوامل الهامة التي تكمن وراء عمل الدماغ في اصداره للنصوص المكتوبة وباقي النشاطات على حد سواء؟ كما راينا ، نستطيع التنبؤ وبشكل جيد عن البنية الاحصائية للنص الذي قد يقدم انسان ما على كتابته ، الا اذا عمد الانسان المعني للتصرف بشكل مخالف ، وعلى الرغم من ذلك فسيفشل في مجانبه عاداته بشكل كامل .

ليست هذه الاعتبارات العامة ، بالطبع ، الهدف الحقيقي لهذا الفصل . فقد انطلقنا للبحث عن نموذج رياضي يكفي لتمثيل الجوانب المختلفة من الكائن الانساني المتعلقة بدوره كمصدر للرسائل ويكفي أيضا لتمثيل النقاط البارزة في الرسائل التي يصدرها . وراينا بأخذ النصوص الانكليزية كمثال أن تواترات ورود كل الاحرف ثابتة بشكل ملفت للنظر الا اذا رغب الكاتب ان يتحاشى بعض الاحرف بشكل متعمد . وبالمثل فتواترات ورود ازواج وثلاثيات الاحرف والزمرة الاعلى أيضا بما فيها الكلمات ، هي ثابتة بدورها .

وراينا أيضا كيفية توليد سلاسل من الاحرف بتواترات تقابل ما يرد في النصوص الانكليزية باستخدام عمليات عشوائية احتمالية مختلفة كنقل كلمات أو احرف نص ما على بطاقات منفصلة ، ثم خلط البطاقات وسحبها بعد ذلك واحدة تلو الأخرى واستخدام ما يرد في كل واحدة لتكوين السلسلة المبتغاة . تستطيع العمليات العشوائية الأكثر تقدما كتلك التي تنفذها الآلات المتناهية الحالات ، ان تنتج تقريب أكبر للنصوص الطبيعية الانكليزية .

وهكذا يمكننا اعتبار العملية العشوائية المعممة كنموذج لمصدر رسائل كممثل مصدر يولد النصوص الانكليزية . ولكن كيف نستطيع تعريف أو تحديد العمليات العشوائية رياضياً بحيث نتمكن من اثبات النظريات الضرورية لترميز الرسائل المولدة من قبل المصدر ؟ يجب بالطبع ان نختار التعريف بحيث يأتي متسقاً مع خصائص النصوص الانكليزية الفعلية .

ان المصدر المستقر هو صنف المصدر العشوائي الذي يتم اختياره كنموذج لمصدر الرسائل الفعلي . ويمكن النظر للمصدر المستقر كحالة افتراضية نتج عدداً لا نهاية له من مجموعات تحوي كل منها عدداً لا نهاية له من سلاسل من الاحرف لا نهائية . يمكننا القول وبشكل مقبول أن الاحصائيات المرتبطة بسلاسل الاحرف أو الرسائل التي ينتجها مصدر مستقر لا تتغير مع الوقت ، فالمصدر اذن متوازن فعلاً . وأكثر من ذلك ، ففي حالة المصدر المستقر تنطبق الاحصاءات المستمدة من رسالة معينة على سائر الرسائل التي يولدها المصدر نفسه .

تبرهن الاستنتاجات المتعلقة بنظرية الاتصالات من أجل المصادر المستقرة الافتراضية . يشكل كل الكتاب مصدراً مستقراً تقريباً للنصوص لا يفترق المصدر المستقر الافتراضي عن المصدر المستقر الفعلي الا قليلاً ، لذا نستطيع تطبيق رياضيات الاول على الثاني والحصول على نتائج مفيدة . الا اننا يجب ان نأخذ ما يلزم من الحذر عند تطبيق احكام نظرية الاتصالات الرياضية المصاغة لمصادر افتراضية ، على المشاكل الفعلية للاتصالات .





## الفصل الرابع

### الترميز ونظام الرسائل السائ

يمكن أن يكون المصدر المعلوماتي نصاً مكتوباً ، انساناً يتكلم ، أصوات جوقة موسيقية ، صوراً ، أفلاماً سينمائية ، أو مشاهد يمكن تسديد الكاميرا التلفزيونية ناحتها . رأينا ، أنه وفق نظرية المعلومات ، تعتبر هذه المصادر مالكة لخصائص المصادر المستقرة التي تولد الأحرف ، الأعداد ، أو الإشارات الكهربائية . ان الهدف الرئيسي لنظرية المعلومات هو دراسة كيفية ترميز سلاسل الأحرف والإشارات هذه بأكثر فعالية ممكنة وبوسائل كهربائية عموماً ، وذلك لإعدادها للإرسال .

لقد سمع الجميع عن الرموز وترميز الرسائل ، أو ما يسمى بالشفرة . وتزخر المكتبات بقصص الأبطال الخياليين الذين يستخدمون الرسائل المرمزة السرية لتنفيذ أعمالهم الخارقة .

استخدمت الكتابة السرية بمعناها التاريخي الرموز لإخفاء مضامين الرسائل الهامة عن كل الذين لم تكن تلك الرسائل تقصدهم . ويمكن تنفيذ ذلك بتبديل كلمات الرسائل بكلمات أخرى مقابلة وفق قاموس ترميز معين . وفي طريقة أخرى للترميز هي طريقة التشفير يستعاض عن الأحرف والأعداد بأحرف أخرى وفق اتفاق بين الأطراف المعنية .

نورد فكرة الترميز ، أي فكرة تمثيل شيء بآخر ، في مجالات أخرى أيضاً . يعتقد علماء الوراثة ان الخطة الشاملة لعمل الجسم الانساني

مكتوبة في الموروثات المدفونة في الخلية التناسلية ويؤكدون أن النص الوراثي يتكون من ترتيب خطي لأربع وحدات داخل حمض الـ DNA المكون للموروثات . ينتج هذا النص بدوره نصاً مكافئاً في حمض الـ RNA ، حيث يتم بواسطة هذا الأخير تصنيع البروتينات من عشرين نوع من الحموض الأمينية . وقد جرت دراسات معمقة لفهم الطريقة التي يعاد وفقها ترميز رسالة الـ RNA الوراثية ذات الأربع مقاطع بحيث تتحول إلى رسالة البروتين ذات العشرين مقطع .

توصل علماء الوراثة إلى هذه الاعتبارات بسبب وجود نظرية المعلومات . أدت دراسة انتقال المعلومات لفهم جديد وعام لمسائل الترميز ، وهو فهم على جانب كبير من الأهمية سواء في مجال ترميز الرسائل ، أو مجال ترميز المعلومات الوراثية .

استعرضنا في الفصل الثاني كيفية ترميز نص لغوي وفق طريقة مورس باستخدام نبضات كهربائية طويلة وقصيرة تفصل بينها فواصل طويلة وقصيرة . كان ذلك مثال بسيط للترميز . ترى نظرية المعلومات في الأمواج الكهربائية التي ترتحل من دار الإذاعة وحتى الراديو في كل منزل أسلوباً في ترميز الموسيقى وسواها مما نسمعه لدى إدارتنا مفتاح جهاز الراديو . وكذلك شأن التيارات الكهربائية في أسلاك الهاتف فهي ترميز للخطاب المتبادل وأخيراً فأمواج الانضغاط والتخلخل في الهواء الناقلة للصوت ما هي إلا ترميز لحركات الحبال الصوتية التي تصدر الأصوات .

حددت الطبيعة ترميز حركات الحبال الصوتية على شكل أصوات التخاطب إلا أنه يمكن لمهندس الاتصالات اختيار طريقة الترميز التي سيمثل بواسطتها أصوات التخاطب بتيارات كهربائية ، تماماً كما يختار نظام النقاط والخطوط والفواصل لتمثيل الأحرف الأبجدية في الإرسال البرقي . ويسمى هذا المهندس لتحقيق أفضل ترميز ممكن ، وللوصول إلى هذه الغاية لا بد من وجود معيار يفصل المهندس بواسطته بين الترميز

الفعال والترميز السيء كما وأن هذا المهندس يجب أن يمتلك النظرة الثاقبة لإنجاز الترميز المنشود . سبق أن تعلمنا بعض هذه الأمور في الفصل الثاني .

أدت دراسة هذه المشكلة بالذات ، وهي دراسة قد تبدو بحد ذاتها محدودة ، الى تطوير أفكار هامة عبر نظرية المعلومات ، تتجسد أكثر ما يمكن في مجال الترميز سواء في إصدار الرسائل السرية أو كشف الشيفرة الوراثية . تضمنت هذه الأفكار معياراً للكم المعلوماتي هو الانتروبي وواحدة لقياس المعلومات هي البيت Bit . .

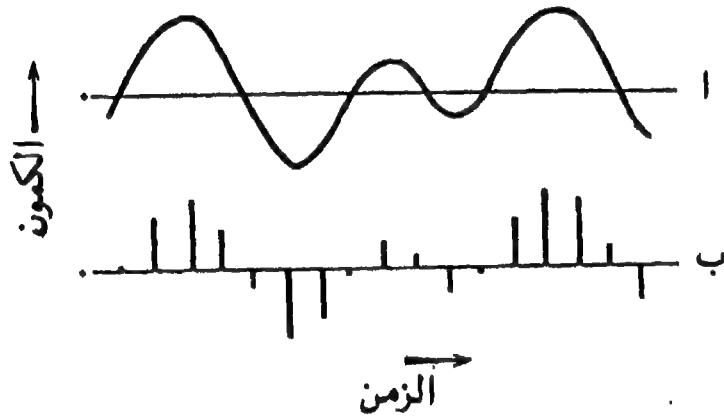
أميل الى الاعتقاد في هذه المرحلة أن القارئ قد أصبح في وضع المطالبة الملحة . لمعرفة معنى ( الكم المعلوماتي ) كما يقاس بالبيت ، وإذا كان هذا هو حاله فعلاً ، فأرجو أن يحمله حماسه عبر كميات من المعلومات الوسيطة تتناول ترميز الرسائل .

لعله امر بديهي أن أحداً ما لن يستطيع فهم وتقييم حل مسألة معينة إلا إذا كان لديه فكرة عن المسألة بحد ذاتها . لن يستطيع أي منا شرح الموسيقى لشخص لم يسمع في حياته أي عمل موسيقي . أشعر بشكل مماثل أنه كي نستطيع تقييم الحاجة لقياس الكم المعلوماتي وفهم معناه لا بد لنا من التناول التفصيلي لكيفية ترميز الرسائل بغية بثها بريقاً .

نلجأ الى الأمثلة البسيطة بغية فهم مشكلة الترميز . ونهدف في النهاية بالطبع الى تعلم ما له فائدة واسعة ، وعند ذلك نتوقع بعض الصعوبات .

تتكون بعض الرسائل الهامة من سلاسل من الأحرف المنفصلة كالأحرف الأبجدية المتتالية أو الأعداد المتتالية في خرج الكمبيوتر . لقد بينا فيما سبق أن أنواعاً أخرى من الرسائل تختلف بشكل جذري .

ان الاصوات والموسيقى هي تغيرات ضغط الهواء عند اذن السامع .  
 نمثل هذا الضغط وبدرجة كافية من الدقة لدى استعمالنا الهاتف  
 بتغيرات كمون اشارة كهربائية مرتحلة عبر الاسلاك او بكمية اخرى  
 مناسبة . يمثل الشكل ٤ - ١ تغير مثل هذه الاشارة مع الزمن حيث  
 نفرض ان الاشارة هي عبارة عن كمون كهربائي متغير مع الوقت ، كما  
 يوضح الخط المتعرج .



الشكل ٤ - ١

تصبح نظرية المعلومات محدودة الاهمية اذا لم تكن قابلة التطبيق  
 على الرسائل والاشارات المستمرة ، كقابليتها للتطبيق على الرسائل  
 المنعزلة ، كالنصوص اللغوية .

تستحضر نظرية المعلومات لدى تناولها الاشارات المستمرة نظرية  
 رياضية هي نظرية العينات ، وسنقوم باستخدامها دون برهانها . تنص  
 هذه النظرية على انه يمكننا تمثيل الاشارة المستمرة بشكل كامل وكذلك  
 اعادة انشائها بكل تفاصيلها اذا توفر لدينا عينات او قياسات لسعتها



منجزة هند لحظات زمنية تفصل بينها فترات متساوية . يجب أن تكون هذه الفترة مساوية أو أقل من نصف دور أعلى تواتر متواجد في الإشارة . وإذا عدنا الى الشكل ٤ - ١ الممثل لإشارة متغيرة مع الزمن فإن العينات المطلوبة في حالة هذه الإشارة يمكن تمثيلها بخطوط شاقولية كما هو موضح في القسم الأسفل من نفس الشكل .

يجب أن نلاحظ أن قدرة هذه العينات على تمثيل الإشارة بشكل كامل تتوقف على توفر عدد كبير منها بدرجة كافية . نحتاج في حالة تواترات الصوت المحصورة بين . و ٤٠٠٠ هـ ف ث الى ٨٠٠٠ عينة في كل ثانية ، أما في الإشارة التلفزيونية التي يتراوح تواترها بين . الى ٤ ملايين هـ ف ث فنحتاج الى ٨ ملايين عينة في كل ثانية . وبصورة عامة إذا كان عرض مجال تواتر الإشارة هو س هـ ف ث ، فنحتاج على الأقل لـ ٢ س عينة في كل ثانية لتوصيف هذه الإشارة بشكل كامل .

وهكذا يمكننا نظرية العينات من تمثيل إشارة مستمرة بسلسلة من العينات مختلفة السعات . تختلف هذه السلسلة ، على كل حال ، عن سلسلة الأحرف أو الأرقام ، فهناك عدد من الأرقام ( ٠ ، ١ ، ٢ ، ٣ ، ٤ ، ٥ ، ٦ ، ٧ ، ٨ ، ٩ ) والأحرف ( الأحرف الأبجدية ) بينما يمكن للعينة أن تتضمن عدداً لا نهاية له من السعات المختلفة . أن كل سعة في عينة يمكنها أن تقع في أي نقطة من مجال مستمر من القيم ، بينما لا ينتقى الرقم أو الحرف إلا من مجموعة محددة من العناصر المنزلة .

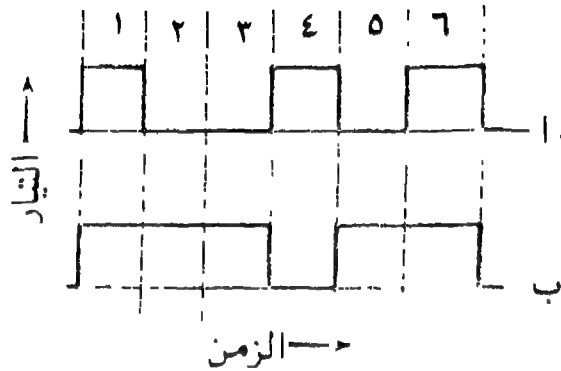
إذا اعتبرنا الطريقة التي تتعامل بها نظرية المعلومات مع العينات ذات المجال المستمر من السعات لرأينا هذه الطريقة تشكل بحثاً بحد ذاته ستعود اليه فيما بعد . سنقتصر هنا على ملاحظة مفادها انه ليس من الضروري ان توصف الإشارة أو تستعاد بشكل كامل ، ففي الأجهزة

الفيزيائية الواقعية لا يمكن استرجاع الاشارة بصيغتها الاصلية . وتكتفي في ارسال الاصوات مثلا بتمثيل سعة العينة بدقة ١٪ . وهكذا يمكننا ، اذا رغبنا ، قصر أنفسنا على الأعداد بين . الى ٩٩ في مجال توصيف ساعات عينات الاصوات المتتالية وتمثيل سعة عينة محددة بأحد الأعداد المئة المذكورة حيث ستكون بذلك قريبة من السعة الحقيقية بدرجة كافية . نستطيع بواسطة عملية تجزئة الاشارة الى عينات الحصول على تمثيل شبيه بحالة الاشارات المنعزلة المثلة لنص لغوي .

استطعنا باستخدام العينات المحددة القيم تحويل مسألة ترميز اشارة مستمرة كالصوت مثلا الى مسألة أبسط هي ترميز اشارات منعزلة كأحرف النصوص اللغوية .

وأينا في الفصل الثاني أن النصوص اللغوية يمكن بثها حرفاً بحرف باستخدام طريقة مورس في الترميز ، وبطريقة مماثلة يمكن بث هذه الرسائل عبر لوحة المبرقة . أن ضغط أحد أزرار هذه اللوحة يؤدي الى امرار سلسلة من النبضات الكهربائية والفواصل عبر الدارة . عندما تصل هذه النبضات والفواصل جهاز الاستقبال تحرض الزر المقابل فتطبع اذ ذاك الآلة الحرف المرسل .

تشكل قطارات النبضات والفواصل طريقة عامة ومفيدة لتوصيف أو ترميز الرسائل . وعلى الرغم من أن شيفرة مورس ورموز المبرقة تستخدم نبضات وفواصل من أطوال مختلفة فإنه بالمقابل يمكن بث الرسائل باستخدام النبضات والفواصل المتساوية الطول المرسله عبر فترات زمنية متساوية . يوضح الشكل ٤ - ٢ كيف يمكننا أن نستخدم النبضات والفواصل المتساوية في تشكيل اشارتين مختلفتين ، تتكون كل منهما من ستة فترات ، فأما الاشارة ١ فتتكون من : نبضة - فاصل - فاصل - نبضة - نبضة - نبضة ، في حين تتكون الاشارة ب من : نبضة - نبضة - نبضة - فاصل - نبضة - نبضة .



الشكل ٤ - ٢

يحدد وجود نبضة أو فاصل في فترة معينة احدي إمكانيتين ، فيمكننا بذلك من الاستخدام اي زوج من الرموز لتمثيل النبضة والفاصل ، ونجد من بين أزواج هذه الرموز : نعم - لا ، + - - ، - - - ، ١ - ٠ .

وبذلك نمثل الإشارة ٢ على النحو :

نبضة	فاصل	نبضة	فاصل	فاصل	نبضة
نعم	لا	نعم	لا	نعم	لا
+	-	+	-	+	-
١	٠	١	٠	١	٠

يتسم التمثيل باستخدام الرمز ٠ ، ١ بكونه هام وملائم بشكل خاص ، اذ يمكن استخدامه لربط قطارات الامواج بنظام العد الثني . عندما نكتب العدد ٣١٥ نعني :

$$\begin{aligned}
 & 1 \times 100 + 1 \times 10 + 5 \times 1 = 115 \\
 & 1 \times 100 + 1 \times 10 + 5 \times 1 = 115
 \end{aligned}$$

نستخدم في النظام العشري المعتاد هذا الارقام العشرة : ٠ ، ١ ، ٢ ، ٣ ، ٤ ، ٥ ، ٦ ، ٧ ، ٨ ، ٩ . اما في النظام المثنى فنستخدم الرقمين ٠ ، ١ . وهكذا عندما نكتب في هذا النظام ١٠٠١٠١ فإنما نعني :

$$\begin{array}{cccccc} & ٠ & ١ & ٢ & ٣ & ٤ & ٥ \\ ٢ \times ١ + ٢ \times ٠ + ٢ \times ١ + ٢ \times ٠ + ٢ \times ٠ + ٢ \times ١ \\ = ٣٧ \text{ في النظام العشري} & = & ١ \times ١ + ٤ \times ١ + ٣٢ \times ١ \end{array}$$

قد يكون من المناسب أحيانا كتابة الاعداد وإضافة اصفار الى يسارها ، ان هذا لا يغير من قيمة العدد . وهكذا ففي النظام العشري :

$$١٦ = ٠٠١٦$$

اما المساواة المقابلة في النظام المثنى فهي :

$$١٠٠٠٠ = ٠٠١٠٠٠٠$$

يدمي كل من الرقمين ٠ او ١ في النظام المثنى برقم مثنى . اذا اردنا توصيف النبضات او الفواصل الواردة في ستة فترات متتالية نستخدم ستة ارقام ثنائية مناسبة . ولما كانت النبضة او الفاصل في فترة واحدة تكافئ رقم مثنى ، نستطيع ان نتحدث في هذه الحالة عن زمرة نبضية من ستة ارقام ثنائية ، كذلك يمكننا ان نشير الى نبضة او فاصل في فترة معينة على انه رقم مثنى .

دعونا نبحث عن عدد الإشارات الممكنة والمختلفة باستخدام ثلاثة ثلاثة فترات متتالية نملئ كل منها بنبضة او فاصل ، بكلمة اوضح ما هو عدد الاعداد في النظام المثنى التي يتكون كل منها من ثلاثة ارقام ثنائية .

ان هذه الاعداد هي ببساطة :

المقابل العشري	العدد بالنظام المثنى
٠	٠٠٠
١	٠٠١
٢	٠١٠
٣	٠١١
٤	١٠٠
٥	١٠١
٦	١١٠
٧	١١١

٣  
 إذن فعدد الأعداد المطلوبة هو ثمانية ونلاحظ أن  $٨ = ٢^٣$  ، وبصورة  
 ن  
 أهم فعدد الأعداد الثنائية المكون كل منها من ن رقم مثنى هو : ٢  
 نوضح في الجدول التالي عدد الأعداد الثنائية المكون كل منها من ن  
 رقم مثنى وذلك من أجل بعض قيم ن :

ن ( عدد الأرقام الثنائية المستخدمة )	عدد الأعداد الناتجة ( نماذج من ن رقم مثنى )
١	٢
٢	٤
٣	٨
٤	١٦
٥	٣٢
١٠	١٠٢٤
٢٠	١٠٤٨٥٧٦

نلاحظ أن عدد الأعداد الناتجة أو عدد النماذج المكونة من ن رقم مثنى  
 يزداد بسرعة كبيرة جداً وسبب ذلك أننا نضاعف العدد المطلوب في كل مرة  
 نضيف مكان جديد في العدد المكون ، فعندما نضيف رقم نحصل على كل  
 الأعداد السابقة مسبقة بـ ٠ وكذلك كل الأعداد السابقة مسبقة بـ ١ .

يشكل النظام المثنى البديل الوحيد للنظام العشري ، إذ أن للنظام الثماني أهمية خاصة لدى بناء أجهزة الكمبيوتر . يستخدم النظام الثماني الأرقام الثمانية : ٠ ، ١ ، ٢ ، ٣ ، ٤ ، ٥ ، ٦ ، ٧ .  
عندما نكتب ٣٥٦ في النظام الثماني نعني :

$$\begin{aligned} & 1 \times 6 + 8 \times 5 + 8 \times 3 = 356 \\ & 1 \times 6 + 8 \times 5 + 64 \times 3 = \\ & 238 = 6 + 40 + 192 = \end{aligned}$$

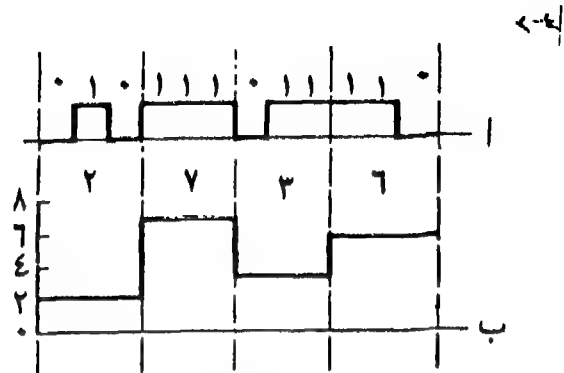
في النظام العشري

نستطيع التحويل بين النظامين المثنى والثماني بسهولة فائقة ، إذ ما علينا إلا استبدال كل تركيب من ثلاثة أرقام ثنائية بمقابلها الثماني كما في المثال التالي :

١١٠	١١١	٠١١	١١٠	مثنى
٢	٧	٣	٦	ثماني

يفضل من يستخدمون الكمبيوتر استظهار ومن ثم استدراك الأرقام من النظام الثماني على التعامل مع السلاسل الطويلة من الأرقام الثنائية .  
انهم يتعلمون تمييز زمر ثلاثية من الأرقام الثنائية والتعامل مع كل زمرة كوحدة ، وهكذا ينظرون إلى تسع أرقام ثنائية على أنها ثلاثة زمر وبشكل أوضح سلسلة من ثلاثة أرقام ثمانية .

انه أمر ممتع حقاً أن نتناول سلاسل النبضات والفواصل وفق نفس المنظور أي أنها تمثل سلاسل من الأرقام الثنائية ، وبالتالي فسلسلة من نبضات ذات سعات مختلفة تقابل سلسلة من الأرقام الثمانية : ( ٠ ، ١ ، ٢ ، ٣ ، ٤ ، ٥ ، ٦ ، ٧ ) . يوضح ذلك الشكل ٤ - ٣ . حيث نرى في القسم أ منه سلسلة من الإرسال - التوقف ، أو الوصل - فصل ، أو ١ - ٠ . مقابلة للعدد المثنى : ٠١٠١١٠١١٠١٠١٠١٠٠ . أما العدد الثماني المقابل فهو : ٢٧٣٦ ، بينما في القسم ب تمثيل آخر للعدد كاربعة نبضات لها السعات التالية : ٦ ٣ ٧ ٢ .



الشكل ٤ - ٣

ان التحويل من النظام المثنى الى النظام العشري ليس امراً سهلاً .  
ويحتاج تمثيل كل رقم عشري حوالي ٣٣٢ رقم ثنائي . يمكننا بالطبع  
تخصيص اربع ارقام ثنائية لكل رقم عشري ، كما هو مبين في الجدول  
التالي الا ان ذلك يعني ضياع بعض التشكيلات دون استخدام ، فهناك  
من تلك التشكيلات اكثر مما يلزمنا :

العدد المثنى	الرقم العشري
٠٠٠٠	٠
٠٠٠١	١
٠٠١٠	٢
٠٠١١	٣
٠١٠٠	٤
٠١٠١	٥
٠١١٠	٦
٠١١١	٧
١٠٠٠	٨
١٠٠١	٩
١٠١٠	غير مستعمل





عندما نتحرك الى الاعلى بدءاً من الجذر الى الفروع فان ورود الصفر  
يعني اختيار الفرع الايسر بينما نختار الفرع الايمن اذا صلاطنا الواحد.  
وهكذا تعني السلسلة ١٠١ . التحرك وفق الاتجاهات التالية : يسار ،  
يمين ، وهذا يحملنا الى الرقم الثماني ٦ .

تطينا ثلاثة ارقام ثنائية المعلومات الكافية لاجراء اختيار معين من  
بين ثمانية امكانات مختلفة ، وبالمثل تطينا اربعة ارقام ثنائية المعلومات  
الكافية لاجراء اختيار معين من بين ١٦ امكانية مختلفة ، ويرتفع هذا  
الرقم الى ١٠٤٨٥٧٦ امكانية مختلفة في حالة توفر ٢٠ رقم مثنى .  
ونحصل على الامكانات المختلفة في كل حالة بتوزيع الارقام الثنائية وبكل  
الاشكال الممكنة في الخانات المعتبرة للعدد المثنى ( ٣ - ٤ - ٥ - ٦ -  
٧ - ٨ - ٩ - ١٠ - ١١ - ١٢ - ١٣ - ١٤ - ١٥ - ١٦ - ١٧ - ١٨ - ١٩ - ٢٠ - الخ ) .

ليس ضرورياً ان تكون تلك الخانات اعداداً ثنائية . فقد بدأنا  
دراستنا ببحث كيفية ترميز النصوص اللغوية بهدف ارسالها برقياً  
بواسطة بلاسل من النبضات الكهربائية والفواصل والتي يمكن بدورها  
ان تمثل بأرقام ثنائية .

يحتاج ارسال النصوص الانكليزية حرفاً بحرف الى ٢٦ حرف وفراغ  
اي ٢٧ رمز ، هذا اذا لم نأخذ بعين الاعتبار الرموز الخاصة كالفواصل  
وغيرها .

يمكننا ان نكتب الاعداد بكلمات وان نهمل رموزها ( مثلاً نكتب ثلاثة  
عوضاً عن ٣ ) ، ونستخدم كلمات للتعبير عن الرموز الخاصة ( مثلاً  
نكتب فاصلة عوضاً عن ، ، نقطتين عوضاً عن : وهكذا ) .

تقول الرياضيات ان الاختيار من بين ٢٧ رمز يحتاج من الارقام  
الثنائية ما يساوي عدده ١٧٥ رقم مثنى . اذا لم نكن معنيين كثيراً  
بالكفاءة العالية فنستطيع تخصيص عدد مثنى مكون ٥ ارقام ثنائية لكل  
حرف وهذا يشكل فائضاً من الاعداد الغير مستخدمة يساوي ٥ اعداد  
ثنائية مكون كل منها من ٥ ارقام ثنائية .

تمتلك بعض الآلات الكاتبة ٤٨ زر مختلف بما في ذلك الرفع وزر الاخلاق ، ويمكن ان نضيف اليها آليتي التقدم بسطر واحد والعودة الى اول السطر . يمكن ان ارمز نشاطاتي باستخدام كل امكانات الآلة الكاتبة ( باستثناء وضع الورق اللازم في الآلة ) وذلك باجراء خيارات متتالية من اصل الـ ٥٠ خيار المتوفر ، حيث يقابل كل خيار ٦٢ رقم مثنى ، وكالمادة يمكن ان نستخدم ٦ ارقام ثنائية لكل زر من ازرار الآلة ونهدر بنتيجة ذلك بعض سلاسل الارقام الثنائية .

يتكون هذا الفائض بسبب وجود ٣٢ عدد مثنى من الاعداد المؤلفه من ٥ ارقام ثنائية وهو عدد قليل ، بينما يوجد ٦٤ عدد مثنى من الاعداد المؤلفه من ٦ ارقام ثنائية وهذا كثير الى حد ما . كيف يمكن ان نتحاشى مثل هذا الهدر ؟ اذا اعتبرنا ٥٠ رمز مختلف فانه يمكننا تكوين ١٢٥٠٠٠ زمرة متباينة تتكون كل زمرة منها من ثلاثة من هذه الرموز . واذا عدنا الى الارقام الثنائية فنستطيع ان نكون ١٣١٠٧٢ تركيب مختلف بحيث يحتوي كل تركيب على ١٧ رقم مثنى . وهكذا اذا جزئنا النص الى زمر من ٣ احرف متتالية واذا ربطنا كل زمرة منها بعدد مثنى مكون من ١٧ رقم مثنى فنحصل على ترميز جيد ويفيض لدينا القليل . اما اذا مثلنا كل حرف ب ٦ ارقام ثنائية الاحتجنا ١٨ رقم مثنى في تمثيل ٣ احرف متتالية ، وهكذا فان طريقة الترميز الاولى خففت من استخدامنا للارقام الثنائية بنسبة  $\frac{17}{18}$  .

يمكننا بالطبع ترميز النصوص الانكليزية بشكل مغاير تماما . ونستطيع استخدام اللغة الانكليزية بشكل فعال اذا احطنا بمعاني حوالى ١٦٣٨٤ كلمة وهو قاموس جيد من الكلمات . يعود اصل هذا الرقم الى اننا نعلم ان هناك ١٦٣٨٤ عدد مثنى يتكون كل منها من ١٤ رقم ثنائي . وهكذا بتخصيص ١٦٣٥٧ من هذه الاعداد لتمثيل الكلمات المستخدمة الضرورية وباقي الـ ٢٧ لتمثيل الاحرف والفراغ ، حصلنا على ترميز جيد سيما وان وجود الاحرف سيفسح المجال لاستخدام

كلمات إضافية لم نلاحظها في القاموس المكون من ١٦٣٥٧ كلمة . ليس من الضروري أن نضع فراغاً بين الكلمات التي تقابلها رموز عديدة إذ يمكن أن نفترض أن الفراغ هو جزء من كل كلمة .

إذا برزت الحاجة لاستخدام بعض الكلمات بشكل غير متواتر ، فيتوجب علينا أن نضع فراغاً بين الكلمات التي تقابلها رموز عديدة في هذا النوع من الترميز . تشير المعدلات الإحصائية إلى أن وسطي عدد الأحرف في كل كلمة من كلمات اللغة الانكليزية هو ٥.٤ حرف . ولما كان من المفروض أن نفصل الكلمات بفراغات عندما نبث الرسالة حرفاً بحرف يرتفع هذا العدد إلى ٥.٥ حرف حتى في حالة إهمالنا بعض الاستخدامات الخاصة في النص كإيراد الأحرف الكبيرة وتوضيع الفواصل . إذا خصصنا ٥ أرقام ثنائية لكل حرف فسيصلنا ٢٧٥ رقم مثنى لكل كلمة ، بينما نحتاج فقط لـ ١٤ رقم مثنى لكل كلمة إذا لجأنا لترميز الكلمات بدلاً من الأحرف وقمنا ببثها كلمة بكلمة .

كيف يمكن أن يحدث ذلك ؟ إذا عمدنا لبث الرسالة حرفاً بحرف فسنستخدم إمكانات متكافئة الإرسال كل سلاسل الأحرف الانكليزية ، أما الإرسال كلمة بكلمة فسيقتصر الأمر على الكلمات الانكليزية وحسب .

أن عدد الأرقام الثنائية الضرورية لترميز كل كلمة من النصوص الانكليزية يتوقف إلى حد بعيد على طريقة الترميز المعتمدة .

أن النصوص اللغوية هي نوع من جملة أنواع أخرى من الرسائل قد نرغب ببثها . تشتمل الأنواع الأخرى على سلاسل الأرقام ، الصوت البشري ، الصور المتحركة أو الصور الثابتة . وهكذا فإذا كانت هناك طرق فعالة وأخرى غير فعالة لترميز النصوص اللغوية ، فننتوقع بالمقابل أن يكون هناك طرق فعالة وأخرى غير فعالة في ترميز الرسائل الأخرى .

يغمرنا اعتقاد كبير بأنه يوجد من حيث المبدأ طريقة مثلى لترميز الإشارات الصادرة عن منبع للرسائل ، مثل هذه الطريقة ستحتاج عدداً أصغرياً من الأرقام الثنائية لكل حرف ولكل واحدة من زمن الإرسال .

إذا توفرت مثل هذه الطريقة المثلى لترميز الإشارة ، فنصطلح على استخدام العدد الوسطي للأرقام الثنائية اللازمة لترميز الإشارة كـمعيـلـ للمحتوى المعلوماتي أو التكم المعلوماتي في كل حرف أو كـمعيـلـ للتكم المعلوماتي الذي يولده في كل ثانية مصدر الرسائل الذي أعطى الإشارة المعتبرة .

هذا ما نفعله بالضبط في نظرية المعلومات ، أما كيفية تحقيق الفعل وأسبابه فسنتركها للفصل القادم .

أما الآن ، فسنراجع وبسرعة ما قدمناه في هذا الفصل . نعتبر الترميز في نظرية المعلومات كقضية أساسية ، والترميز ببساطة هو تمثيل إشارة بغيرها . وهكذا تمثل أمواج الراديو أصوات التخاطب وبدا فهي ترميز لتلك الأصوات . يمكننا بحث الترميز ببساطة وعمق في حالة مصادر الرسائل المتقطعة والتي تولد رسائل مؤلفة من سلاسل من الأحرف أو الأرقام . أما عن الإشارات المستمرة ، فالامر أعقد لأنه لحسن الحظ نستطيع تمثيل الإشارة المستمرة بعينات من ساعاتها وذلك باستخدام عدد من العينات في كل ثانية يساوي ضعف أعلى تواتر للإشارة ، وخير مثال على الإشارات المستمرة التيارات الكهربائية في خطوط الهاتف . بل ونستطيع أكثر من ذلك ، فبإمكاننا تمثيل ساعات هذه العينات بأعداد صحيحة .

أن أهم طرق ترميز الأحرف أو الأعداد في نظرية الاتصالات هي تلك التي تعتمد سلاسل من القطع والوصل والتي بدورها يمكن أن تمثل بالأرقام الثنائية . ١٠٤ . وكمثال على ذلك : إذا استخدمنا سلاسل من زمر بحيث تتكون كل زمرة من ٤ أرقام ثنائية نستطيع تكوين ١٦ عدد ثنائي نخصص منها ١٠ لتمثيل الأرقام العشرية ، وإذا رفعنا محتوى كل زمرة إلى ٥ أرقام ثنائية ارتفع عدد الأعداد الثنائية المكونة إلى ٣٢ ، نجتزئ منها ٢٧ لتمثيل الأبجدية في اللغة الانكليزية مع فراغ مضاف . باختصار نستطيع إرسال الأعداد العشرية والنصوص اللغوية ببث سلاسل كهربائية تتضمن القطع والوصل .

يجدر بنا أن نقف عند فكرة هامة ، فعلى الرغم من أنه يبدو مريحاً أن نعتبر الأرقام الثنائية المستخدمة بهذا الشكل أعداداً ثنائية بالمعنى الرياضي ، فإن هذا المعنى ليس له أي أهمية البتة في عملنا ، إذ أن بمقدورنا اختيار أي عدد ثنائي لتمثيل عدد عشري معلوم .

أن استخدامنا لعشرة من الأعداد الثنائية المكون كل منها من أربعة أرقام ثنائية يعني هدراً للأعداد الستة الأخرى . نستطيع أن نرسل هذه الأعداد وفق نفس تقنية القطع والوصل ، إلا أننا لا نفعل ذلك أبداً . يمكننا تحاشي مثل هذا الهدر بترميز سلاسل مؤلفة من ٢ ، ٣ ، أو أكثر من الأرقام العشرية أو الأحرف الأخرى بواسطة الأرقام الثنائية . فمثلاً يمكننا تمثيل كل السلاسل المكونة من ثلاثة أرقام عشرية باستخدام عشرة أرقام ثنائية ، بينما يقتضي الأمر ١٢ رقم ثنائي لتمثيل المنفصل لكل من الأرقام العشرية الثلاثة .

أن ورود أي سلسلة من الأرقام العشرية هو أمر ممكن ، إلا أن سلاسل الأحرف لا ترد جميعها ، إذ لا يرد من سلاسل الأحرف إلا الكلمات المستخدمة في اللغة المعتبرة . ويبدو استناداً لهذه الحقيقة أن ترميز الكلمات باستخدام الأرقام الثنائية سيكون أكثر كفاءة من ترميز الأحرف الأبجدية تعزز هذه النتيجة صحة الفكرة القائلة أن ترميز السلاسل أكثر اقتصاداً من ترميز عناصرها بشكل منفصل .

يقودنا كل ذلك إلى الحدس بأن هناك طريقة مثلى لترميز الرسائل التي يولدها مصدر رسائل ، وتعرف هذه الطريقة بكونها تحتاج إلى أصغر كمية ممكنة من الأرقام الثنائية .





## الفصل الخامس

### للنثري

استعرضنا في الفصل السابق طرقاً مختلفة لترميز الرسائل، وتتضمن كل أنواع الاتصالات ، في الواقع ، ضرباً من الترميز . ففي الحالة الكهربائية ، يمكن ترميز الأحرف باستخدام نقاط وخطوط التيار الكهربائي أو شدة مختلفة للتيار واتجاهات عديدة لتدفعه كما في مبرقة اديسون الرباعية . كذلك يمكننا ترميز الرسالة باستخدام الأرقام الثنائية : ٠ ، ١ وبها كهربائياً كسلسلة من النبضات والفواصل .

لقد بينا بالفعل أن أخذ العينات بشكل دوري من إشارة مستمرة كموجة التخاطب مثلاً ، وأن تمثيل شدة العينات بشكل تقريبي عن طريق انتقاء أقرب قيمة من مجموعة من الأعداد المنفصلة ، كل ذلك يمكننا من تمثيل أو ترميز حتى الإشارات المستمرة باستخدام الأرقام الثنائية .

أوضحنا أن عدد الأرقام التي يحتاجها الترميز يتوقف على طريقة الترميز . وهكذا يلزمنا عدد أقل من الأرقام الثنائية إذا رمزنا زمراً من الأحرف عوضاً عن ترميز كل حرف على حدة . ونظراً لأن عدد تراكيب الأحرف المعتمدة في اللغة قليل جداً بالمقارنة مع كل تراكيب الأحرف ، فإن الأمر المهم هنا هو أن ترميز الكلمات في نص معين سيستهلك عدداً من الأرقام الثنائية أقل بكثير مما لو رمزنا أحرف النص كل على حدة .

نؤكد ان هناك طرقاً عديدة لترميز الرسائل المتولدة عن مصدر مستقر ، كمصدر للنصوص اللغوية مثلاً . ماذا ستكون الحاجة الفعلية من الارقام الثنائية لكل حرف أو كلمة ؟ هل سيتحتم علينا تجريب كل أشكال الترميز الممكنة لنقرر أيها الامثل . ولكن اذا جربنا كل الاشكال الممكنة وانتقينا الامثل ، فسنبقى في شك من أمرنا ، اذ قد يكون شكل الترميز الامثل ذاك الذي لم يخطر على بالنا وبالتالي لم نجربه .

الا توجد طريقة احصائية ، على الأقل من حيث المبدأ ، تمكننا من اجراء معايير احصائية على الرسائل المتولدة عن مصدر معين ، مثل تلك المعايير ستلفت نظرنا الى قيمة صفري وسطية لعدد الارقام الثنائية المقابلة لكل إشارة ، ويمكن استخدام هذه القيمة في ترميز الرسائل .

نعود الى نموذج المصدر المرسل الذي عرضناه في الفصل الثالث واعتبرنا انه مصدر مستقر للرموز كالأحرف أو الكلمات . يتسم المصدر بخصائص إحصائية ثابتة مثل : التواتر النسبي للرموز ، احتمال أن يلي رمز معين رمزاً آخر معلوم أو زوجاً من رمزين محددين ، أو تركيباً من ثلاثة رموز وغير ذلك .

نتحدث في حالة النصوص اللغوية عن التواترات النسبية للكلمات وعن احتمال أن تلي كلمة معينة كلمة أخرى معلومة ، أو زوجاً من الكلمات ، أو تركيباً ثلاثياً منها ، وكذلك التراكيب الأعلى .

لقد عمدنا بهدف توضيح الخصائص الاحصائية لسلاسل الأحرف أو الكلمات لشرح كيفية انشاء التراكيب تشبه النصوص اللغوية الطبيعية وذلك باجراء سلسلة من الخيارات العشوائية بين الأحرف والكلمات ، بشرط أن يؤخذ بعين الاعتبار الاحتمالات الخاصة بتلك الأحرف والكلمات ، أو احتمالات سبقها لسلاسل أخرى من الأحرف والكلمات . لقد انجزنا الخيلرات العشوائية في هذه الامثلة برمي حجر النرد أو السحب العشوائي لبطاقة من جعبة أو غير ذلك من العمليات الاحتمالية .



نمارس خيلاً مشابهاً أثناء الكتابة أو القراءة : ماذا سنقول بعد أو ماذا ستكون جملتنا التالية . لا نجد في بعض الأحيان أي خيار ففي اللغة الانكليزية مثلاً إذا كتبنا الحرف Q فعلياً بشكل ملزم أن نكتب بعده الحرف U . وبصورة عامة يكون لدينا خيار أكبر لدى محاولتنا كتابة الحرف الثاني من كلمة بالمقارنة مع الخيار المتبقي لدى بلوغنا منتصف الكلمة . يبرز الخيار ، على الرغم من ذلك ، ويمارس بشكل مستمر في كل مصدر للرسائل سواء أكان حياً أو ميكانيكياً . ولولا ذلك لكافت كل الرسائل المصدرة مفرقة سلفاً بشكل كامل وقابلة للتنبؤ الدقيق .

يقابل الخيار الذي يملسه مصدر الرسائل لدى توليده رسالة معينة ، درجة من الرتبة لدى المستقبل يمكن حلها لدى تفحص الرسالة. ان هدف الاتصال ونتيجته الأولى تكمن في حل هذه الرتبة أو الدرجة من الرتبة .

إذا لم ينطو مصدر الرسائل على أي خيار ، أي إذا لم يكن على سبيل المثال بمقدوره ان ينتج إلا سلاسل لا نهاية لها من عنصر مكرر هو الواحد ، أو سلاسل لا نهاية لها من عنصر مكرر هو الصفر ، كان المستقبل بالمقابل في حل من أي التزام تجاه تفسير الرسالة وتفحصها لمعرفة محتواها ، إذ بإمكانه في هذه الحالة وببساطة التنبؤ بها بشكل دقيق وكامل . وهكذا إذا كنا نرغب بقياس المعلومات بطريقة عقلية ، كان علينا تبني المعيار الذي يزيد بازدياد الخيارات المطروحة أمام المصدر، أي المعيار الذي يزيد بازدياد رتبة المستقبل إزاء ما سيقوم المصدر بتوليده وبشبه .

إن لكل مصدر بالطبع ، كمية من الرسائل الطويلة أكثر مما له من الرسائل القصيرة . فمثلاً هناك رسالتان ممكنتان تتألف كل واحدة منهما من رقم ثنائي واحد ، و٤ تتألف كل منها من رقمين ثنائيين ، و١٦ في كل منها ٤ أرقام ثنائية ، و٢٥٦ رسالة في كل رسالة ٨ أرقام ثنائية

وهكذا . هل من الواجب علينا أن نقول أن كمية المعلومات إنما يقيسها عدد هذه الرسائل ؟ لتصور أربعة خطوط برقية تستخدم بشكل آني لنقل الأرقام الثنائية وبنفس السرعة ، طبعاً نستطيع باستخدام هذه الخطوط إرسال كمية من الأرقام تساوي أربعة أضعاف ما يمكننا إرساله في حالة خط واحد . إذا كان الأمر كذلك ، إذن لوجب علينا قياس كمية المعلومات بدلالة عدد الأرقام الثنائية عوضاً عن عدد التراكيب المختلفة التي يمكن للأرقام الثنائية تشكيلها، وهذا يعني بالتالي أن كمية المعلومات يجب ألا تقاس بعدد الرسائل الممكنة ، بل بلوغريتم هذا العدد .

إن قياس كمية المعلومات كما تطرحه نظرية الاتصالات تؤمن ذلك ، وهو أمر منطقي إذا نظر إليه من جوانب أخرى أيضاً . يدعى مقياس كمية المعلومات بالانتروبي . إذا رغبتنا بفهم الانتروبي كما تطرحها نظرية الاتصالات فعلىنا تناسي الانتروبي التي تقدمها الفيزياء . وعندما نتفهم الانتروبي الخاصة بنظرية الاتصالات ، فلن يكون هناك أي ضير إذا حاولنا ربطها بالانتروبي الفيزياء ، وإن كانت أدبيات الفيزياء تؤكد أن المفاهيم الذين حاولوا ذلك لم يستطيعوا الخروج من الفوضى التي خلقها خلط الأفكار بين انتروبي الفيزياء وانتروبي الاتصالات .

تقاس انتروبي الفيزياء بوحدة البيت Bit . وهكذا نتحدث عن انتروبي مصدر رسائل معين على أنه مساوٍ لكل بيت لكل حرف ، أو لكل كلمة ، أو لكل رسالة . إذا كانت سرعة توليد المصدر للرموز ثابتة، أمكننا القول أن هذا المصدر يملك انتروبي تساوي لكل بيت في الثانية .

تزداد الانتروبي بازدياد عدد الرسائل التي يمكن للمصدر إجراء الخيار بينها ، وهي تزداد أيضاً بازدياد حرية الخيار ( أو بازدياد رية المستقبل ) وتنقص بازدياد الحدود المفروضة على حرية الخيار والرية . فمثلاً حصر بعض الرسائل سواء بالإقلال من إرسالها أو تكرارها كثيراً سينقص حرية الخيار لدى المصدر. وكلما الرية لدى المستقبل ، والنتيجة هي انخفاض الانتروبي .

لا شك سيكون أمراً متميزاً أن نوضح الانثروبي أولاً بمثال . تعامل نظرية الاتصالات الرياضية مصدر الرسائل على أنه مصدر مستقر حيث يتم إنتاج سلاسل من الإشارات هي إلى حد ما غير قابلة للتنبؤ . يجب أن نتخيل المصدر وهو ينتقي إحدى الرسائل بوسائط غير قابلة للتنبؤ أي عشوائية ، ولعل أبسط شكل للتنبؤ ذاك الذي يفترض وجود رمزين فقط س ، ص يقوم المصدر وبشكل متكرر بإجراء الخيار بينهما وبشكل مستقل أي أن الخيار الحالي غير مرتبط بالخيارات السابقة . لا نعلم في هذه الحالة إلا أن الرمز س يمكن أن يختار باحتمال ح . ، و ص يمكن أن يختار باحتمال ح<sub>١</sub> ، تلمأ كما في حالة قذف قطعة نقد معدنية . يمكن للمستقبل أن يكتشف هذه الاحتمالات بتفحص سلاسل طويلة يولدها المصدر مكونة من هذين الرمزين س ، ص . يجب أن تبقى القيمتان ح . ، ح<sub>١</sub> ثابتتين مع الوقت إذا كان المصدر مستقراً .

تساوي الانثروبي في هذه الحالة البسيطة :

$$T = - (ح. ل ح. + ح_١ ل ح_١) \text{ بيت لكل رمز}$$

وهكذا تساوي الانثروبي الماكس بالإشارة لمجموع حدين هما : احتمال اختيار الرمز س مضروباً بلوغاريتمه واحتمال اختيار الرمز ص مضروباً بلوغاريتمه .

إن السبب الحقيقي لتعريف الانثروبي على هذا النحو للحالة البسيطة وفي الحالات الأعقد لن يتضح مهما حاولنا بناء حجج معقولة ، وواقع الأمر أن الموضوع المنشود لن يتحقق إلا من خلال تقديمنا المطرد في البحث ، لذا فإن تبرير العلاقة الأخيرة سيؤجل إلى مرحلة لاحقة . نستذكر أن اللوغاريتم يؤخذ بالنسبة لأسس مختلفة ، والأساس المعتبر للوغاريتم في نظرية المعلومات هو الأساس ٢ . يوضح الجدول التالي بعض خواص اللوغاريتم .

لوغاريتمه	طريقة ثالثة في كتابته	طريقة ثانية في كتابته	الكسر
٠.٤١٥ -	$\frac{٠.٤١٥}{٢}$	$\frac{١}{٢}$	$\frac{٣}{٤}$
١ -	$\frac{١}{٢}$	$\frac{١}{٢}$	$\frac{١}{٢}$
١.٤١٥ -	$\frac{١.٤١٥}{٢}$	$\frac{١}{٢}$	$\frac{٣}{٨}$
٢ -	$\frac{٢}{٢}$	$\frac{١}{٢}$	$\frac{١}{٤}$
٣ -	$\frac{٣}{٢}$	$\frac{١}{٢}$	$\frac{١}{٨}$
٤ -	$\frac{٤}{٢}$	$\frac{١}{٢}$	$\frac{١}{١٦}$
٦ -	$\frac{٦}{٢}$	$\frac{١}{٢}$	$\frac{١}{٦٤}$
٨ -	$\frac{٨}{٢}$	$\frac{١}{٢}$	$\frac{١}{٢٥٦}$

يعرف لوغاريتم العدد من الأساس ٢ على أنه القوة التي إذا رفع عليها العدد ٢ حصلنا على العدد المعتبر. .

لنتخيل مصدراً للرسائل ينطوي على قذف قطعة نقد معدنية .  
ولتكن س ممثلة ( للطرة ) وص ممثلة ( للنقش ) . عندها يتساوى  
الاحتمالان ح. ، ح. ، ويكون : ح. = ح. =  $\frac{١}{٢}$  أي ان احتمال الطرة مثل  
احتمال النقش ويساوي كل من الاحتمالين  $\frac{١}{٢}$  .

تساوي الانتروبي في هذه الحالة ووفق علاقتنا السابقة :

$$ت = - ( \frac{1}{2} \text{ لع } \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \text{ لع } \frac{1}{2} )$$

$$= - ( \frac{1}{2} \times 1 + \frac{1}{2} \times 1 ) = -1$$

$$= - ( \frac{1}{2} - \frac{1}{2} ) = 1 \text{ بيت لكل رمية لقطعة النقد :}$$

إذا ولد مصدر الإرسال سلسلة مكونة من ( الطرة ) و ( النقش ) ناجمة عن رمي قطعة النقد فإن الأمر يستلزم بيت واحدة من المعلومات لنقل رسالة تفيد عن ظهور الطرة أو النقش .

لنلاحظ الآن أننا نستطيع تمثيل خرج ( رميات متتالية لقطعة النقد بواسطة أرقام ثنائية تساوي في عددها عدد الرميات الواقعة ، ونختار ١ لتمثيل الطرة و ٠ لتمثيل النقش . وهكذا وفي هذه الحالة على الأقل ، يتساوى الرقم الدال على الانتروبي : ١ بيت لكل رمية مع الرقم الدال على الأرقام الثنائية اللازمة لتمثيل الخرج في كل رمية وهو ١ رقم ثنائي للرمية ، أي يتساوى في هذه الحالة عدد الأرقام الثنائية الضرورية لنقل الرسائل التي يولدها المصدر (تتالي الطرة والنقش) مع انتروبي المصدر.

نفرض الآن أن المصدر يولد سلسلة مكونة من ٠ و ١ باستخدام قطعة نقد خاصة تظهر النقش في  $\frac{1}{2}$  الحالات والطرّة في  $\frac{1}{2}$  الحالات . يكون لدينا في هذه الحالة :

$$١ ح = \frac{1}{2} \text{ ح} = \frac{1}{2}$$

$$ت = - ( \frac{1}{2} \text{ لع } \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \text{ لع } \frac{1}{2} )$$

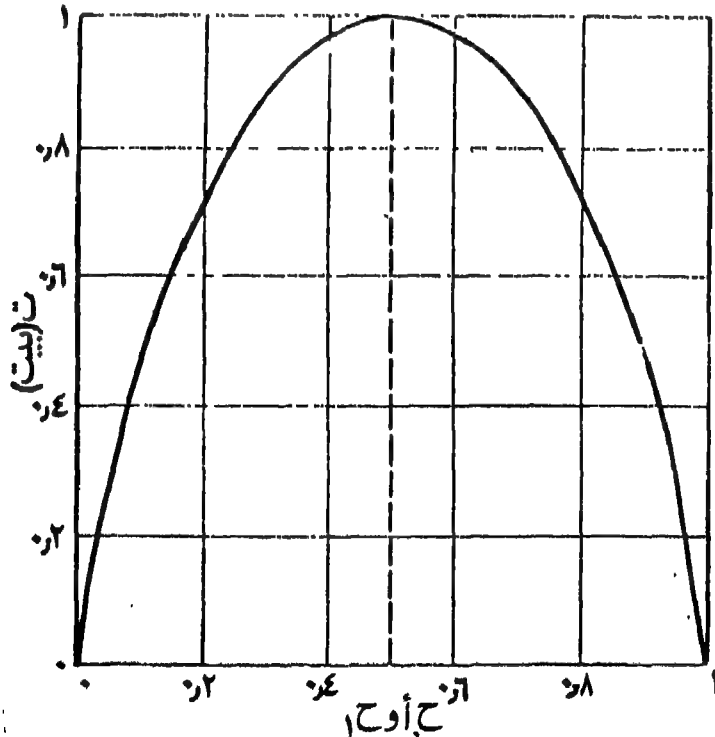
$$= - ( \frac{1}{2} \times 1 + \frac{1}{2} \times 1 ) = -1$$

$$= 1 \text{ بيت لكل رمية}$$

نشعر أنه باستخدامنا قطعة النقد الخاصة هذه تزداد معرفتنا بالخرج بالمقارنة مع قطعة النقد السابقة . وأكثر من ذلك ، فتقييدنا بالحصول على النقش بأكثر من حصولنا على الطرة يقلل من الخيارات الممكنة التي توافرت عندما كان احتمال حصولنا على الطرة مساوياً لاحتمال حصولنا على النقش . يبدو أن هذا صحيح فعلاً لأنه إذا ارتفع احتمال النقش إلى ١ وانخفض احتمال الطرة إلى صفر ، لانعدمت الخيارات أمامنا بشكل كامل . وكما رأينا في حالة قطعة النقد الخاصة

فإن الانتروبي تساوي ٨.١١. بيت لكل رمية . نتصور عند هذه المرحلة أنه يجب أن تتوفر لدينا القدرة على تمثيل الخرج الخاص برميات قطعة النقد الخاصة المفترضة بعدد أقل من الأرقام الثنائية لكل رمية إلا أنه ليس واضحاً كم يلزمنا من الأرقام الثنائية .

إذا كان احتمال ورود النقش ح ، كان احتمال ورود الطرة ح.  $1 - 1 = 1$  وهكلا تتوقف معرفتنا لأحد الاحتمالين على معرفتنا الاحتمال الآخر . يمكننا استناداً الى ذلك حساب قيم متعددة لـ ت مقابلة لقيم مختلفة لـ ح. ومن ثم توقيع منحنياً بيانياً يربط بين ح ، ت . يوضح الشكل ٥ - ١ هذا المنحني حيث تصل ت الى قيمتها العظمى من أجل ح =  $\frac{1}{2}$  ، بينما تصبح ت مساوية للصفر من أجل قيمتين لـ ح هما : ١ ، ٠ . أي عندما يقتصر الاصدار على أحد الرمزين دون الآخر .



الشكل ٥ - ١



$= - ( - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} ) = 2$  بيت لكل رمية مزدوجة يحتاج الامر كمية من المعلومات تساوي 2 بيت لتوصيف او نقل خرج عملية رمي قطعتي نقد في وقت واحد . وكما في حالة رمي قطعة نقد واحدة يتساوى فيها احتمال ورود الطرة مع احتمال ورود النقش ، نستطيع في حالتنا الجديدة هذه استخدام رقمين ثنائيين لتوصيف خرج رمي القطعتين اذ نربط رقم ثنائي بكل قطعة على حدة . يفضي كل هذا الى امكانية بث الرسالة المولدة في حالتنا هذه ( رمي قطعتي النقد ) باستخدام عدد من الارقام الثنائية مساوٍ للانتروبي .

اذا توفر لدينا مجموعة من الرموز عددها  $n$  متكافئة في احتمال ظهورها ، كان ذلك الاحتمال مساوياً  $\frac{1}{n}$  . يكون لدينا في هذه الحالة

عدد من الحدود يساوي  $n$  ، حيث يساوي كل حد بدوره الى  $\frac{1}{n}$  لع  $\frac{1}{n}$

$$T = - \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} \log \frac{1}{n} = \log n$$

مثلاً عندما نرمي حجر النرد ، يتساوى احتمال ظهور أي من وجوهه مع احتمال ظهور أي وجه آخر ، وهذا الاحتمال هو  $\frac{1}{6}$  ، وتكون الانتروبي في هذه الحالة  $- \log \frac{1}{6} = \log 6 \approx 2.58$  بيت لكل رمية .

وبصورة عامة نفترض اننا اخترنا في كل مرة وباحتمالات متساوية عدداً ثنائياً من مجموعة اعداد ثنائية يتكون كل منها من  $m$  رقم ثنائي . ولما كان هناك  $2^m$  من هذه الاعداد ، نحصل على :

$$T = - \sum_{i=1}^{2^m} \frac{1}{2^m} \log \frac{1}{2^m} = \log 2^m = m$$



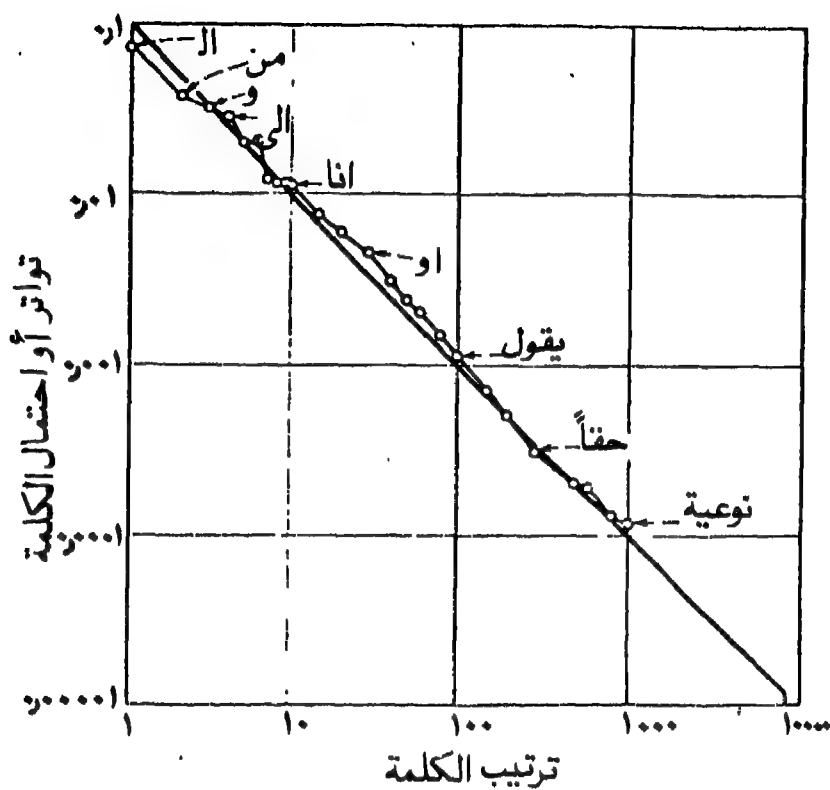
وهكذا فمن أجل مصدر يولد عند كل خيار وبنفس الاحتمال عددا ثنائيا مكونا من ( هـ ) رقم ثنائي ، تكون الانتروبي مساوية لـ هـ بيت لكل عدد . ان الرسالة التي يولدها المصدر هنا عبارة عن عدد ثنائي يمكن تمثيله بالطبع بأرقام ثنائية ، وايضا تمثل هذه الرسالة بعدد من الارقام الثنائية يساوي لانتروبي الرسالة مقاسة بالبيت . يوضح هذا المثال كيف ان على اللوغاريتم ان يكون التابع الرياضي ذي الدور الرئيسي في تعريف الانتروبي .

تختلف في الحالة العادية ، احتمالات توليد المصدر للاشارات باختلاف الاشارة المولدة . نأخذ كمثال مصدرا مرسلًا يولد الكلمات من اللغة الانكليزية بحيث يستقل ورود كل كلمة جديدة عما قبلها ولكن بالاخذ بعين الاعتبار لاحتمالات ورود الاحرف في النصوص الانكليزية وهو ما اشرنا اليه على انه التقريب الاول في الفصل الثالث .

اذا ربنا كلمات الانكليزية وفق تواتر ورودها الشائع ، تقع الكلمات الاكثر تواترا في المقام الاول أي تعطى الرقم ١ مثل كلمات ( the, in fact ) بينما الكلمات التالية في التواتر تعطى الرقم ٢ مثل كلمة of ، وهكذا فاحتمال الكلمة ذات الترتيب ر ( اذا لم تكن ر كبيرة جدا ) هو :

$$\frac{1}{2^r} = P_r$$

يوضح الشكل ٥ - ٢ المخطط البياني لهذه العلاقة النظرية ممثلا بالخط الاسود الممتد من أعلى اليسار الى أسفل يمين الشكل ، كما يوضح التقارب الشديد بين هذا الخط النظري والنقاط الموقعة بشكل تجريبي ، وتعرف هذه العلاقة باسم علاقة زيف وستعرض لها في الفصل السابع ، بينما سنكتفي هنا باستخدامها .



## الشكل ٥ - ٢

نستطيع أن نبرهن على أن هذه العلاقة ليست صحيحة بالنسبة لكل الكلمات ، ويتضح ذلك إذا اعتبرنا رمي قطعة النقد المعدنية إذا تساوى احتمال ظهور الطرة والنقش وكان كل منهما مساوياً  $\frac{1}{2}$  ، فلن يكون هناك خرج ممكن آخر لأن  $\frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1$  . أما إذا كان احتمال أن تقف قطعة النقد على حافتها غير مساوي للصفر ، كان يساوي  $\frac{1}{10}$

مثلاً ، فنتوقع عندها أنه في حالة ١٠٠ رمية يمكن أن تظهر الطرة في ٥٠ من الحالات وأن يظهر النقش في ٥٠ حالة أخرى ، وأن تقف القطعة على حافتها في عشرة حالات . يظهر هذا وكأنه مضحك ، إذ يجب أن يكون مجموع كل الاحتمالات مساوياً الواحد . لنلاحظ أنه إذا أضفنا الاحتمالات التي تعطيها العلاقة السابقة : ح ١ ثم ح ٢ ثم .....  
ح

فسنجد أن المجموع سيصبح مساوياً الواحد عند إضافة ٨٧٢٧ . إذا قبلنا هذه الحقيقة كما هي ، فنصل إلى نتيجة مفادها أنه لا يمكننا أن نستخدم أي كلمة بعد ذلك . واقع الأمر أن العلاقة الأخيرة تقريبية إلى حد ما .

ومهما يكن من أمر فالخطأ المرتكب ليس كبيراً ، وقد استخدم شانون هذه العلاقة في حساب الانتروبي الخاصة بمصدر رسائل يولد الكلمات بشكل مستقل ولكن بالأخذ بعين الاعتبار لاحتمالات ورودها في النصوص الانكليزية ، ولكي يحافظ على القيمة النظرية لمجموع الاحتمالات وهي ١ ، فقد اعتبر الكلمات الـ ٨٧٢٧ الأكثر شيوعاً في اللغة الانكليزية وحسب الانتروبي استناداً لذلك فوجدها مساوية لـ ٩١٤ بيت لكل كلمة .

وجدنا في الفصل الرابع أنه يمكن ترميز النصوص الإنكليزية حرفاً بحرف باستخدام ٥ أرقام ثنائية لكل حرف أو ٢٧٥ رقم ثنائي لكل كلمة ، كما استعرضنا كيفية استخدام السلاسل المختلفة من الأرقام الثنائية لترميز ١٦٣٥٧ كلمة و ٢٦ حرف وفراغ واحد ، وأن توظيف ١٤ رقم ثنائي لكل كلمة يفرض ترميز النصوص الإنكليزية . يصل بنا ذلك إلى حالة من التشكيك فيما إذا كانت الانتروبي تعطي فعلاً عدد الأرقام الثنائية اللازمة ، إذ كما أسلفنا ، يشير حساب شانون المستند إلى الاحتمالات النسبية لكلمات اللغة الإنكليزية إلى أن ٩١٤ رقم ثنائي لكل كلمة يكفي فعلاً .

أما خطواتنا التالية في طريق اكتشاف عدد الأرقام الثنائية اللازمة لترميز رسالة يولدها مصدر مرسل فتتضمن عرض نظرية مدهشة برهنها شانون تتعلق بالمصادر المستقرة حيث تجري خيالات مستقلة وفق احتمالات معينة للأحرف أو الكلمات .

نعتبر كل الرسائل التي يمكن للمصدر أن يولدها والتي تتألف من عناصر معينة تضم عدداً كبيراً من الاحرف . مثلاً الرسائل التي تتكون كل منها ١٠٠٠٠ رمز (احرف ، كلمات ، ... الخ) ، وبصورة أعم الرسائل المكونة من  $n$  حرف . إن بعض هذه الرسائل محتمل أكثر من الرسائل الأخرى . يرد الرمز الأول في الرسائل المحتملة :  $1 \times n$  ، بينما يرد الرمز الثاني  $2 \times n$  وهكذا . إذن يرد كل رمز في الرسائل المحتملة وفق التواتر المميز للمصدر . وعلى الرغم من ذلك فيمكن للمصدر توليد أنواع أخرى من الرسائل ، كأن يصدر رسالة مكونة من رمز واحد مكرر بشكل لا نهائي ، أو أن يصدر الرموز بغير تواترات ورودها المشار إليها ، إلا أن هذا المصدر قلما يفعل ذلك .

إن الحقيقة الهامة هي أنه إذا كانت  $T$  هي انتروبي المصدر ،

ت ن

فسكون هناك بالضبط حوالي ٢ رسالة محتملة ، أما الرسائل المتبقية الأخرى فسكون احتمال ورودها صغيراً بدرجة يمكن إهماله . وبعبارة أوضح ، إذا صنفنا الرسائل من أكثرها احتمالاً إلى أدناها احتمالاً ،

ت ن

وربطنا بالرسائل الأكثر احتمالاً التي عددها ٢ أعداداً ثنائية عددها  $T$  ، فسكون على يقين من أن كل رسالة مكونة من  $n$  رمز سيولدها المصدر بشكل فعلي لا شك سيقابلها عدد معين .

نلجأ لتوضيح هذه الأفكار إلى حالات خاصة بسيطة . نفرض أن الرموز المنتجة هي ١ ، ٢ . إذا تساوى احتمال هذين الرمزتين وكان كل منهما مساوياً  $\frac{1}{2}$  ، كانت الانتروبي كما رأينا مساوية لـ ١ بيت لكل رمز . نفرض أن المصدر يولد رسائل يساوي طولها ١٠٠٠ رقم ٢ فيكون

١٠٠٠

الجداء  $T = 1000$  ووفق نظرية شانون يجب أن يكون هناك ٢ رسالة محتملة .

١٠٠٠  
 ان استخدام ١٠٠٠ رقم ثنائي يمكننا من كتابة ٢ عدد ثنائي .  
 وهكذا فلتحديد رقم ثنائي مختلف لكل رسالة محتملة علينا استخدام  
 اعداد ثنائية يتكون كل منها من ١٠٠٠ رقم ثنائي . وهذا ما توقعناه  
 بالضبط . فلنحدد للمستقبل اي الاعداد الثنائية المكونة من ١٠٠٠  
 رقم ثنائي يقوم المصدر بتوليدها ، علينا بث رسالة مكونة من ١٠٠٠  
 رقم ثنائي .

نفرض ان الارقام المكونة للرسائل التي يولدها مصدر الرسائل يتم  
 اختيارها لرمي قطعة نقد احتمال الطرة فيها  $\frac{1}{2}$  واحتمال لنقش  $\frac{1}{2}$  ،  
 وهكذا فالرسائل النموذجية المتولدة عن هذا المصدر تحوي من ال ١ اكثر  
 مما تحوي من ال ٠ ، إلا ان هذا ليس كل ما في الامر . رأينا ان الانتروبي  
 في هذه الحالة هي ٨.١١ ر. بيت لكل رمية ، وإذا اعتبرنا مرة أخرى  
 مساوية لـ ١٠٠٠ ، أي أن طول كل رسالة هو ١٠٠٠ رقم ثنائي ، فيكون  
 الجداء ن ت مساوياً لـ ٨.١١ ، وبينما كان عدد الرسائل الممكنة سابقاً هو  
 ١٠٠٠ ٨.١١  
 ٢ أصبح في هذه الحالة ٢ فقط .

٨.١١  
 ان استخدام ٨.١١ رقم ثنائي يمكننا من كتابة ٢ عدد ثنائي حيث  
 نستطيع ربط كل واحد من هذه الاعداد لكل رسالة ممكنة قوامها ١٠٠٠  
 رقم ثنائي تاركين الرسائل الغير ممكنة والتي عددها ١٠٠٠ دون ترقيم .  
 وهكذا يمكننا ان نرسل الى المستقبل ما يدل على الرسالة ذات الطول  
 ١٠٠٠ رقم التي يولدها المصدر ببث ٨.١١ رقم ثنائي فقط . ويبقى احتمال  
 أن يولد المصدر إحدى الرسائل غير المحتملة مهملاً بدرجة كافية .  
 لا نستطيع تقديم ضمانات مطلقة فيما يخص معالجاتنا حتى الآن ، فمصدر  
 ٨.١١  
 الرسائل قد يولد رسالة غير مقرونة بعدد من بين اعدادنا الـ ٢ المكونة  
 من ٨.١١ رقم ثنائي . لا نستطيع في هذه الحالة بث الرسالة ، على الأقل  
 باستخدام ٨.١١ رقم ثنائي .

نصادف مرة أخرى ما يؤكد لنا أن عدد الأرقام الثنائية اللازمة لبيت رسالة ما يساوي حاصل ضرب الانتروبي مقدرة بالبيت لكل رمز في عدد الرموز . يجدر بنا أن نتذكر أننا حققنا في ايضاحنا الاخير بثاً اقتصادياً بترميز التراكيب ، أي باعتبار رسالة من ألف رقم وأكثر ومن ثم ترميزها برمز خاص ، وكذلك ترميز الرسائل المائلة باستخدام ٨/١١ رقم ثنائي .

ما مدى صحة هذا الافتراض ؟

لقد عالجتنا حتى الآن الحالات التي يولد فيها مصدر الإرسال الرموز المختلفة ( أعداد ، أحرف ، كلمات ) بشكل مستقل عن الرموز التي ولدها في مرحلة سابقة . أن هذا الأسلوب لا يتفق وطريقة إنشاء النصوص اللغوية ، فإلى جانب القيود الإحصائية على تواتر الكلمات ، هناك قيود أخرى على ترتيب الكلمات ، لذا سيكون الخيار أمام الكاتب عند كتابته كلمة جديدة أقل مما لو كانت الفرصة متاحة أمامه لانتقاء هذه الكلمة بشكل مستقل عما سبقها .

كيف يمكن أن نعالج مثل هذه الحالة . نجد مفتاح الحل في طريقة ترميز التراكيب التي شرحناها في الفصل الرابع والتي استعملناها مرة ثانية في المثال الأخير . إذا كان المصدر مستقراً فيعتمد الحرف التالي على واحد أو أكثر من الأحرف الخمسة السابقة وليس على الأحرف التي تسبق هذه المجموعة . يوضح التقريبان الثاني والثالث المقدمان في الفصل الثالث كيفية توليد نص وفق هذه الطريقة . إذا اعتبرنا عملية مستقرة ما أي عملية المسؤول الأول فيها هو مصدر مستقر ، وكانت تلك العملية من النوع القابل للنمذجة الرياضية ، لوجب أن يكون تأثير الماضي على الرموز الجديدة المتولدة متناقصاً كلما كان ذلك الماضي أبعد . ينطبق ذلك على توليد النصوص اللغوية ، وعلى الرغم من أنه يمكننا تصور حدوث العكس ( كأن نستخدم نفس الاسم لشخصيات رواية ما ) ، فإن الكلمات التي اكتبها الآن تعتمد على ما كتبتة سابقاً قبل عشرة آلاف كلمة من موقع الكلمة المعنية .

نفرض الآن أننا نجزي الرسالة قبل ترميزها الى تراكيب طويلة من الرموز . اذا كانت هذه التراكيب طويلة بما فيه الكفاية فسيتقصر تأثير الرموز من تركيب سابق على الرموز الاولى فقط من التركيب التالي ، واذا زدنا في طول التراكيب كثيراً ، فان عدد الرموز المتأثرة تلك سيكون مهملاً بالمقارنة مع عدد الرموز في كل تركيب . يؤولنا ذلك لحساب انتروبي كل تركيب ولتحقيق هذا الحساب نفرض احتمال التركيب ذي الترتيب  $m$  هو :  $C(m, n)$  ، و ستكون الانتروبي معطاة بالعلاقة :

ت =  $\sum_{m=1}^n C(m, n) \times \log C(m, n)$  بيت لكل تركيب  
سيمترض اي رياضي على تسمية هذه الكمية بالانتروبي ، وبدلاً من ذلك سيقول انها ستقترب من الانتروبي بزيادة طول التراكيب ، اي بتضمينها اعداداً اكبر من الرموز . لذا علينا ان نفترض أننا سنزيد من طول التراكيب لنقترب اكثر واكثر من القيمة الحقيقية للانتروبي . وفي اطار هذا الشرط نستطيع ان نحسب الانتروبي لكل رمز ، بان تقسم الانتروبي على عدد الرموز الواردة في التراكيب  $n$  ، اي :

ت (الرمز) =  $\frac{1}{n} \sum_{m=1}^n C(m, n) \times \log C(m, n)$  بيت لكل رمز  
تؤدي حسابات الانتروبي في غالبية الاحيان الى قيم عالية اذا لم تأخذ بعين الاعتبار العلاقات بين الرموز وهكذا اذا زدنا  $n$  في العلاقة الاخيرة بشكل مطرد اقتربنا باستمرار من القيمة الحقيقية للانتروبي .

لقد قرنا منذ البداية ان تعريف كمية المعلومات يجب ان يتسق مع فكرة بث عدة رسائل منفصلة عبر اسلاك مختلفة بحيث تساوي الكمية الاجمالية للمعلومات المرسله مجموع الكميات المرسله عبر كل سلك على حدة . وهكذا فللحصول على الانتروبي بجملة مصادر مستقلة عاملة في نفس الوقت ما علينا الا جمع الانتروبي لكل مصدر . نذهب

أبعد من ذلك ونفترض أن المصدر يعمل بشكل متقطع عندها يجب أن  
نضرب سرعة انبثاق المعلومات عنه أو الانتروبي الخاصة به بالنسبة المئوية  
لوقت عمله وذلك بغية الحصول على قيمة وسطية لسرعة إصداره  
للمعلومات .

نفرض جدلاً أنه لدى أرسالنا سلسلة من الأحرف التكوينية مثل  
TH كان لدينا مصدر إرسال وحيد . يكون احتمال ورود الحرف E  
في الإصدار التالي عالياً جداً في هذه الحالة . وقد أصبح لدينا مصدر  
إرسال آخر عند بثنا لزوج الأحرف NQ . يكون احتمال ورود الحرف  
U . في هذه الحالة مساوياً الواحد . لنحسب الانتروبي لكل من هذين  
المصدرين . نشير إلى انتروبي كل مصدر بالرمز  $\mu$  ، ثم نضرب هذه  
الانتروبي بالعدد ح ( ب ) الدال على احتمال عمل ذلك المصدر ( أي  
بنسبة الفترة التي يعمل ذلك المصدر خلالها ) ثم نجمع كل الأرقام  
النتيجة لنحصل على متوسط الانتروبي أو إجمالي سرعة المصدر الذي  
هو عبارة عن اتحاد عدة مصادر يعمل كل منها لفترة زمنية محددة .  
نعتبر كمثال مصدراً ينطوي على احتمالات أزواج فقط ، أي أن مجمل  
تأثير الماضي ينحصر في الحرف الأخير الصادر فكل حرف تواتر وروده  
كالحرف E يتواتر ١٣ ٪ ، وكالحرف W تواتر وروده ٢ ٪ .

نصيغ كل ما تقدم في لغة رياضية متماسكة فنفرض أن تركيباً معيناً  
مكوناً من ن رمز قد تم توليده من قبل المصدر ، فإذا رمزنا لهذا التركيب  
بالرمز  $\mu$  نصطلح على احتمال أن يكون الرمز التالي هو  $\mu$  س بالرمز

ح ( س )  
 $\mu$



يعتبر هذا المصدر عاملاً فقط عندما يصدر تركيب ما عنه ، تساوي  
الانثروبي الخاصة به في هذه الحالة :

$$- \begin{matrix} \text{ح} & \text{ح} & \text{ل} \\ \text{ب} & \text{ب} & \text{ل} \\ \text{م} & \text{م} & \text{ل} \end{matrix} \begin{matrix} \text{ل} & \text{ل} & \text{ل} \\ \text{ب} & \text{ب} & \text{ب} \\ \text{م} & \text{م} & \text{م} \end{matrix} \begin{matrix} \text{ل} & \text{ل} & \text{ل} \\ \text{ب} & \text{ب} & \text{ب} \\ \text{م} & \text{م} & \text{م} \end{matrix} \begin{matrix} \text{ل} & \text{ل} & \text{ل} \\ \text{ب} & \text{ب} & \text{ب} \\ \text{م} & \text{م} & \text{م} \end{matrix}$$

حيث اعتبرنا هنا صدور التركيب ب المكون من ن رمز وتم اجراء الجمع  
لكل الرموز بدءاً من ل = ا وحتى ل = ن .

ولكن ماهي نسبة الفترات التي يعمل خلالها هذا المصدر . تعتبر  
بالنسبة لهذا المصدر فترة عمل تلك الفترة التي يصدر خلالها تركيب  
مكون من ن رمز وليس أي نوع آخر من التركيب . وهكذا اذا دعونا  
احدى هذه الفترات الخاصة بالتركيب ب بتسمية مثل ح ( ب ) ،  
واخذنا بعين الاعتبار كل التراكييب المكونة من ن رمز ، نحسب مجموع  
الانثروبي لكل منها على حدة ، ونعتبر توليد كل تركيب على انه مصدر  
بالتركيب الخاص ب من ن رمز الذي سبق اختيار الرمز س ل ، تكون  
الانثروبي المطلوبة :

$$ت = \begin{matrix} \text{ح} & \text{ح} & \text{ل} \\ \text{ب} & \text{ب} & \text{ل} \\ \text{م} & \text{م} & \text{ل} \end{matrix} \begin{matrix} \text{ل} & \text{ل} & \text{ل} \\ \text{ب} & \text{ب} & \text{ب} \\ \text{م} & \text{م} & \text{م} \end{matrix} \begin{matrix} \text{ل} & \text{ل} & \text{ل} \\ \text{ب} & \text{ب} & \text{ب} \\ \text{م} & \text{م} & \text{م} \end{matrix} \begin{matrix} \text{ل} & \text{ل} & \text{ل} \\ \text{ب} & \text{ب} & \text{ب} \\ \text{م} & \text{م} & \text{م} \end{matrix}$$

يعني ارتباط الرمزين م ، ل اشارة التجميع مساهمة كل الحدود  
المثلية بأحد الدليلين م ، ل في المجموع المذكور .

اذا زدنا عدد الرموز ن السابقة للرمز س ل بحيث يصبح كبيراً جداً  
تقترب القيمة ت بشكل مطرد من انثروبي المصدر . واذا لم يكن هناك  
أي تأثيرات احصائية صادرة عن مصادر تبعد عن الرمز المعتبر بأكثر من  
ن رمز كانت ت هي قيمة الانثروبي الحقيقية ( تصح هذا الحالة من  
أجل مصدر يولد الأزواج وقيمة ل ن = ا ، أو مصدر يولد التراكييب  
الثلاثية وقيمة ل ن = ٢ ) .

يكتب شانون العلاقة الأخيرة بشكل مختلف قليلا . ان حاصل ضرب احتمال اصدار التركيب المعني ح ( ب ) في احتمال ورود الرمز

س<sub>ل</sub> بعد التركيب ب :  $\text{ح } ( \text{س } ) = \text{ح } ( \text{ب } , \text{س } )$  يساوي احتمال اصدار التركيب ب متبوع بالرمز س وهو وفق شانون :  $\text{ح } ( \text{ب } , \text{س } ) = \text{ح } ( \text{س } )$  وبهذا تصبح العلاقة الأخيرة على الشكل :

$$\text{ت} = \text{ح } ( \text{ب } , \text{س } ) = \text{ح } ( \text{س } )$$

اعتبرنا في الفصل الثالث الآلة المنتهية الحالات كذلك التي وضعها الشكل ٣ - ٣ ، كمصدر للنصوص . يمكننا ان نستند في حساب الانتروبي الى هذه الآلة حيث نعتبر كل حالة من حالاتها كمصدر للرسائل ونحسب الانتروبي المقابلة ، ثم نضربها باحتمال ان تصبح الآلة في تلك الحالة وتجمع كل الحدود المماثلة لنحصل على القيمة الاجمالية للانتروبي

ننتقل الى الصياغة الرمزية لهذه الافكار . نفرض انه عندما تكون الآلة في الحالة م ، يكون بمقدورها ان تصدر الرمز ل باحتمال مقداره  $\text{ح } ( \text{ل } )$  ، فاذا كانت الآلة مثلا في الحالة التي نرمز لها بالعدد ١ فقد يكون بمقدورها اصدار الرمز :  $\text{ل} = ٣$  باحتمال قدره  $\frac{١}{٣}$  وهكذا نكتب :

$$\text{ح } ( ٣ ) = \frac{١}{٣}$$

تساوي الانتروبي الكلية للحالة م للآلة مجموع كل انتروبي مقابلة لاصدار رمز معين ل اي :

$$\text{ت} = \text{ح } ( \text{ل } ) = \text{ح } ( \text{ل } )$$

نصطلح الآن على أن لالة احتمال  $\mu$  أن تكون في الحالة  $\mu$  ، وهكذا  
تكون انتروبي الالة لكل رمز ، على اعتبار أن الالة مصدر للرموز :

$$N = \sum_{\mu} \mu \log_2 \frac{1}{\mu} \quad \text{بيت لكل رمز}$$

نعيد كتابة ذلك بالشكل التالي :

$$N = - \sum_{\mu} \mu \log_2 \mu = - \sum_{\mu} \mu \log_2 \mu \quad \text{بيت لكل رمز}$$

مرة أخرى ، يعني ارتباط الدليلين  $\mu$  ،  $\nu$  بإشارة المجموع مساهمة كل الحدود المديلة يهدين الدليلين في المجموع المذكور .

لقد حققنا وبغاية البساطة النقلة من حساب الانتروبي لحالة مصدر يولد الرموز بشكل مستقل الى حالة مصدر يولد الرموز معتمداً في توليده لكل رمز على ما سبق من الرموز ، كما استعرضنا بدائل ثلاثة لحساب أو تعريف الانتروبي الخاصة بمصدر مرسل ، حيث تتكافئ هذه البدائل وهي ذات صحة مقبولة في حالة المصادر المستقرة . علينا أن نتذكر في هذا المعرض أن مصادر النصوص اللغوية تعتبر وبشكل تقريبي مصادر مستقرة .

ليس تعريف الانتروبي لكل رمز بالشكل المتكامل السابق نهاية المطاف إذ تبرز مشكلة أهم وهي كيف نربط تلك الانتروبي بشكل واضح مع عدد الأرقام الثنائية لكل رمز اللازمة لترميز الرسالة .

لقد رأينا أن تجزئة الرسالة في تراكيب من الأحرف أو الكلمات ومعاملة كل تركيب كرمز يمكننا من حساب الانتروبي لكل تركيب باستخدام العلاقة الخاصة بحساب الانتروبي لكل رمز على حدة ، وأن زيادة حجم التراكيب تقربنا أكثر وأكثر من انتروبي المصدر .

تتضمن المشكلة اذن في اكتشاف طريقة الترميز الفعال باستخدام  
الارقام الثنائية لسلاسل الرموز المنتقاة من زمرة كبيرة جدا من الرموز ،  
حيث يحكم اختيار كل رمز احتمال معين . اوضح شانون وفانو كيفية  
اجراء مثل هذا الترميز المطلوب ، بينما هو فمان طريقة احسن سنستعرضها  
فيما يلي .

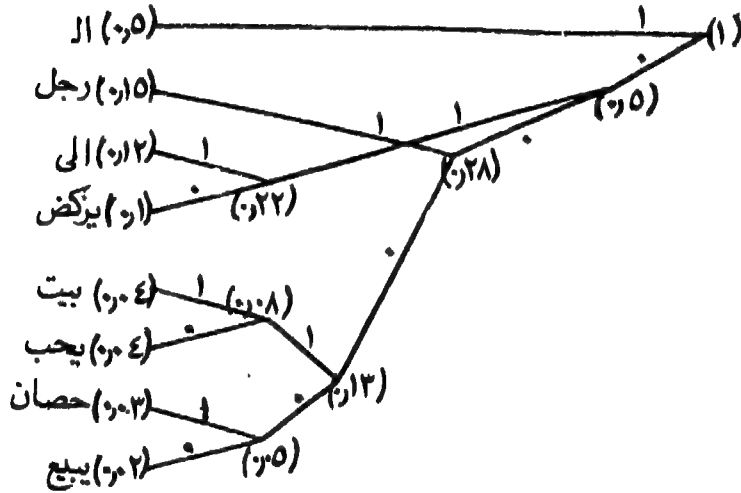
سندرج بهدف الايضاح كل الرموز الممكنة وفق احتمالاتها المتناقضة  
نفرض ان هذه الرموز هي الكلمات التالية : ال ، رجل ، الى ، يركض ،  
بيت ، يحب ، حصان ، يبيع والتي ترد بشكل مستقل وفق احتمالات  
محددة لدى اختيارها . يوضح الجدول التالي هذه الرموز مع احتمالاتها :

الكلمة	الاحتمال
ال	٪٥٠
رجل	٪١٥
الى	٪١٢
يركض	٪١٠
بيت	٪٠٤
يحب	٪٠٤
حصان	٪٠٣
يبيع	٪٠٢

نحسب الانثروبي لكل كلمة باستخدام علاقاتنا السابقة فنجد انها  
٢٢١ بيت لكل كلمة . اذا ربطنا بكل كلمة احد الاعداد الثمانية الثمانية  
المكون كل منها من ثلاثة ارقام ثنائية ، لاحتجنا بالتالي لثلاثة ارقام بهدف  
بت كل كلمة . كيف يمكن ان ترمز الكلمات بشكل اكثر فعالية .

يوضح الشكل ٥ - ٣ اكثر الطرق فعالية لترميز الرسالة كلمة بكلمة  
ندرج الكلمات على يسار الشكل ونضع الاحتمالات بين اقواس . نختار أولا  
الاحتمالين الادنى كمرحلة اولى لانشاء الترميز المطلوب : يبيع ٪٢ ،  
حصان ٪٠٣ . ثم نرسم خطين باتجاه النقطة ٥.٥ وهي احتمال يبيع

أو حصان . نضع جانبا بعد ذلك الاحتمالات المفردة التي تم ربطها بخطوط ونحدد الاحتمالين الأدنى اللذين لم يرتبطا بعد بخطوط وهما هنا : ٠.٤ ر. « يحب » و ٠.٤ ر. « بيت » . نرسم خطين الى نقطة ٠.٨ ر. وهي مجموع ٠.٤ ر. و ٠.٤ ر. . نستعرض الان الاحتمالات المتبقية مع الاحتمالين الجديدين المتولدين ٠.٥ ر. ، ٠.٨ ر. ، فيكون أدنى احتمالين هما ٠.٥ ر. ، ٠.٨ ر. لذا نصلهما بخطين الى النقطة ١.٣ ر. . نتابع بهذا الشكل حتى تنتهي كل الخطوط الى نقطة مشتركة في اقصى اليمين وهي النقطة التي نشر إليها بالرقم ١ .



الشكل ٥ - ٣

نبدأ بعد ذلك من هذه النقطة الأخيرة ونتحرك نحو اليسار واضعياً الرقم ١ على كل خط متفرع من أي نقطة جهة الأعلى والرقم ٠ على خط متفرع من نفس النقطة جهة الأسفل . نحصل أخيراً على الترميز المطلوب لكل كلمة وهو عبارة عن سلسلة الأرقام التي نواجهها لدى انطلاقنا من النقطة ١ باتجاه الكلمة المعنية .

ندرج فيما يلي ترميز كل كلمة :

الكلمة	الاحتمال: ح	الرمز	عدد الارقام في الرمز ن	حاصل الضرب ن × ح
ال	%٥٠	١	١	%٥٠
رجل	%١٥	٠٠١	٣	%٤٥
الي	%١٢	٠١١	٣	%٣٦
يركض	%١٠	٠١٠	٣	%٣٠
بيت	%٠٤	٠٠٠١١	٥	%٢٠
يحب	%٠٤	٠٠٠١٠	٥	%٢٠
حصان	%٠٣	٠٠٠٠١	٥	%١٥
يبيع	%٠٢	٠٠٠٠٠	٥	%١٠
				٢٠٢٦

يعطى حاصل ضرب احتمال ورود الكلمة في عدد الارقام المتضمنة في رمزها العدد الوسطي للارقام في كل كلمة محتواة في رسالة طويلة والناجم من ورد تلك الكلمة . يساوي مجموع . حواصل الضرب المذكورة ٢٠٢٦ ، وهذا هو اكبر بقليل من الانتروبي المحسوبة لكل كلمة والتي وجدناها ٢٠٢١ بيت لكل كلمة ، الا ان هذا المجموع اقل من عدد الارقام التي يمكن ان نستخدمها لتمثيل كل كلمة والمساوي لـ ٣ ارقام .

لا تقتصر ميزات طريقة هوفمان على انها الطريقة الأكثر كفاءة لترميز مجموعة من الرموز لها احتمالات مختلفة ، بل يمكننا ان نبرهن ان ما تستلزمه من ارقام يزيد بقليل عن قيمة الانتروبي (كانت الزيادة في مثالنا ٥.٥ من الرقم الثنائي لكل رمز ) ، وان هذه الزيادة لا قيمة لها البتة .

نفرض اننا نقوم بدمج الرموز قبل ترميزها في تراكيب مكونة من رمز ، اثنين ، ثلاثة ، او اكثر . سيرتبط بكل من هذه التراكيب احتمال معين ( يساوي في حالة الخيار المستقل للرموز حاصل ضرب الرموز المنتقاة لانشاء سلسلة معينة ) . يمكننا استخدام طريقة هوفمان لترميز هذه

التراكيب . عندما نزيد حجم التراكيب ، يزيد بالمقابل عدد الارقام الثنائية المثلة لكل تركيب . الا ان طريقة هوفمان تستدعي من الارقام الثنائية لكل تركيب ما يزيد قليلا عن الانتروبي . وهكذا ان الزيادة المطرد لعدد الارقام الثنائية المستخدمة لترميز تركيب معين والناتج عن ازدياد عدد الرموز في كل تركيب ، سيؤدي عندما يبلغ طول الرمز حدا كبيرا جدا الى اهمال الجزء البسيط للغاية الذي يعرف عدد الرموز في طريقة هوفمان عن الانتروبي ، وستساوى في النهاية الانتروبي مع عدد هوفمان .

نصور قناة اتصال يمكنها بث عدد من نبضات القطع والفصل مساوي لـ ص في كل ثانية يمكن لهذه القناة امرار ص رقم ثنائي . اذا كانت ت هي انتروبي مصدر الرسائل مقاسة بالبيت في كل ثانية ، وكانت ت اقل من ص ، فان استخدام طريقة هوفمان سيمكن من ارسال الاشارات المرمزة عبر هذه القناة .

لا تمرر كل الاقنية الارقام الثنائية ، فبعض الاقنية مثلا تسمح بثلاثة نبضات من شدات مختلفة ، او نبضات مختلفة باطوال مختلفة كشيفرة مورس مثلا . نستطيع بذلك تصور قناة واحدة وقد وصلت الى عدة مصادر للرسائل لكل منها انتروبي خاصة وسرعة اصدار للمعلومات ونختار منها المصدر ذي الانتروبي الاعظمية ونسمي هذه الانتروبي سعة القناة ونرمز لها بالرمز ص ، تقاس طبعا بالبيت في الثانية .

يفضي استخدام طريقة هوفمان الى ترميز خرج القناة عندما تبث رسالة ذات انتروبي اعظمية باستخدام اقل عدد ممكن من الارقام الثنائية في الثانية ، وعندما تعتبر رسائل ممتدة مرمزة في سلاسل ممتدة من الارقام الثنائية ، يلزم عدد من الارقام الثنائية قريب جدا ، لـ ص لتمثيل الاشارات العابرة للقناة .

يمكن استخدام أسلوب الترميز هذا باتجاه معاكس ، اذ قد نلجا لترميز عدد من الارقام الثنائية مساوي لـ ص في كل ثانية وارسالها عبر القناة وهكذا نستطيع ترميز مصدر ذي انتروبي بت باستخدام ت رقم ثنائي في الثانية ، وامرار ص بيت في كل ثانية عبر قناة منعزلة سعتها ص .

لقد اصبحنا الآن في وضع يمكننا من تقديم واحدة من اهم النظريات المرتبطة بنظرية المعلومات . دعاهما شانون بالنظرية الاساسية للاقية . الخالية من الضجيج ، وصاغها على النحو التالي :

نفرض مصدرا ذي انتروبي ت بيت لكل رمز وقناة سعتها في الارسال ص بيت في الثانية . يمكن في اطار هذا الافتراض ترميز خرج المصدر بحيث يبت بسرعة وسطية مقدارها  $(\frac{ص}{ت} - ه)$  رمز في الثانية عبر القناة حيث ه كمية صغيرة للغاية ، ولا يمكن ان يبت بسرعة وسطية تتجاوز القيمة  $\frac{ص}{ت}$  .

نعيد عرض هذه النظرية بعيدا عن تقنياتها الرياضية . لكل قناة منعزلة معتبرة لها سعة ص خاصة بها ، سواء انقلت تلك القناة الارقام الثنائية ، الاحرف والاعداد ، او النقاط ، الفواصل والخطوط من طول معين ، كما ان لكل مستقر انتروبي معينة ت . اذا كانت ت اقل او تساوي ص فاننا نستطيع بث الرسائل التي يولدها المصدر عبر القناة . اما اذا كانت اكبر من ص ، فعلينا الا نبث الرسائل المولدة من المصدر عبر القناة ، لان جهودنا لتحقيق ذلك ، ببساطة ، لن تفلح .

اوضحنا فيما تقدم كيفية برهان القسم الاول من هذه النظرية ، بينما لم نتطرق الى استحالة ترميز مصدر ذي انتروبي ت بعدد من الارقام الثنائية لكل رمز اقل من ت ، الا ان ذلك يمكن برهانه ببساطة .

نشعر في هذه المرحلة اننا احطنا وبثقة بحقيقة هامة مفادها ان انتروبي المصدر المرسل مقاسة بالبيت تطلعا على عدد الارقام الثنائية



اللازمة لكل حرف أو كلمة أو في كل ثانية من أجل بث الرسائل التي يولد المصدر (تقابل هذه الأرقام الثنائية نبضات الفصل والواصل ، واصطلاحات نعم ولا ) يرجع هذا التمييز إلى بحث شانون الأساسي . واقع الأمر أن مصطلح بيت وهو في اللغة الانكليزية Bit منحوت باختصار من كلمتين Binary أي ثنائي و digit أي رقم .

تختلف الانتروبي ، على كل حال ، مقدرة البيت عن عدد الأرقام الثنائية على الصعيد العملي . نعرض على سبيل المثال مصدر رسائل يولد بشكل عشوائي الرمز ١ وفق احتمال مساو لـ ١/٢ والرمز ٠ باحتمال مقابل يساوي ١/٢ ، وأن ذلك المصدر يولد الرموز المشار إليها بسرعة ١٠ رموز في كل ثانية . صحيح أن هذا المصدر يعطي الأرقام الثنائية بمقدار ١٠ أرقام في كل ثانية ، إلا أن السرعة المعلوماتية له والانتروبي تساوي فقط ٨.١١ بيت لكل رقم ثنائي وهي تساوي ٨.١١ بيت في كل ثانية . نستطيع ترميز سلسلة الأرقام الثنائية المنتجة من قبل هذا المصدر باستخدام عدد وسطي من الأرقام الثنائية مساوي لـ ٨.١١ في كل ثانية .

نفترض ، شكل مماثل قناة اتصال قادرة على نقل ١٠٠٠٠٠ نبضة قطع ووصل في كل ثانية . أن سعة هذه القناة هي ١٠٠٠٠ بيت في كل ثانية حسب ما تقدم ، إلا أن استخدامها لنقل نموذج متكرر من النبضات سيعني بالتالي عدم نقلها أي معلومات ، بشكل أدق تكون سرعة نقلها للمعلومات في هذه الحالة مساوية لصفر بيت في الثانية على الرغم من سعتها التي أشرنا إليها .

انطوى إدراجنا لمفهوم البيت هنا على المقايضة الثنائية لكمية المعلومات ، كقياس الانتروبي أو سرعة المعلوماتية لمصدر رسائل وفق واحدة البيت لكل رمز أو البيت في الثانية ، أو كقياس لامكانيات قناة ما في مجال نقل المعلومات مقاسة بالبيت لكل رمز أو البيت في الثانية . نستطيع وصف البيت على أنها خيار أولي ثنائي أو قرار يبين امكانييتين متساويتي الاحتمال . تمثل البيت عند مصدر الرسائل كم محدد من

الخيار فيما يتعلق بالرسالة التي سيتم اصدارها . وكمثال على ذلك نذكر ان كتابة النصوص اللغوية تضعنا امام خيار وسطي قدره ١ بيت لكل حرف . تتكشف واحدة البيت عند المستقبل عن درجة من الريبة ، ففي استعراض النصوص اللغوية هناك تقريبا ١ بيت من الريبة فيما سيكون عليه الحرف التالي .

عندما نبث رسائل منتجة من مصدر معين بواسطة نبضات القطع والوصل ، فاننا نعلم بدرجة كافية كمية الارقام الثنائية المنطلقة في كل ثانية حتى عندما لا نعلم أي شيء عن الانتروبي المصدر ، وينطبق هذا في معظم الحالات . اذا عرفنا ان انتروبي المصدر اقل من الارقام الثنائية التي يتم توزيعها في كل ثانية ، لعلنا اذ ذاك بشكل مسبق امكان قيامنا بالعمل باستخدام عدد اقل من الارقام الثنائية في كل ثانية . لقد تعلمنا كيفية استخدام الارقام الثنائية لتقرير خيار واحد من عدة امكانات مختلفة ، اما باستخدام شجرة كتلك التي وضحتها الشكل ٤ - ٤ ، او بواسطة طريقة هوفمان التي عرضها الشكل ٥ - ٣ . انه امر شائع في مثل هذه الحالات ان نتحدث عن سرعة البث مقدرة بالبيت في الثانية ، الا ان ذلك قد يشوش من ليس لديهم خبرة كافية ويعثر خطاهم .

كل ما اطلبه من القارئ العزيز ان يتذكر انني استخدمت البيت في معرض واحد فقط هو قياس المعلومات ، وانني دعوت ال . او ال ١ رقم ثنائي . اذا ارسلنا ١٠٠٠ رقم ثنائي اخترت بشكل حر في كل ثانية نستطيع اذا ذاك تنفيذ بث معلوماتي بمعدل ١٠٠٠ بيت في كل ثانية . اذا وجدنا من المناسب استخدام البيت في معرض تناولنا للرقم الثنائي فعلياً في هذه الحالة ان نكون متفهمين وبدقة لما نحن قائلون .

نتوقفه الآن للحظة بقصد العودة الى طريقة هوفمان التي عرضناها للتو . عندما نستخدم هذه الطريقة لترميز رسالة ما ونحصل على سلسلة غير متقطعة من الرموز كيف لنا ان نقرر فيما اذا كان هلينا استخدام رمز معين مثل ١ واردة في سلسلة الرموز كمثل لكلمة ال او كمثل لكلمة اخرى .

إذا عدنا الى مثالنا في حالة طريقة هوفمان نلاحظ ان اي من الرموز الواردة لا يشكل الجزء الاول من رمز آخر . تسمى هذه الظاهرة بخاصة البدء ولها نتائج هامة ومدهشة سهلة الايضاح . نفرض مثلاً اننا نرمز الرسالة . الرجل يبيع البيت الى الرجل الحصان يركض الى الرجل . تكون الرسالة المرمزة على الشكل التالي :

ال	رجل	يبيع	ال	بيت
١	٠ ٠ ١	٠ ٠ ٠ ٠ ٠	١	٠ ٠ ٠ ١ ١
			ال	رجل
الى	ال	رجل	ال	حصان
١ ١	١	٠ ٠ ١	١	٠ ٠ ٠ ٠ ١
الى	ال	رجل	ال	حصان
يركض	الى	ال	رجل	يركض
٠ ١ ٠	٠ ١ ١	١	٠ ٠ ١	٠ ٠ ١
يركض	الى	ال	رجل	يركض

كتبنا هنا كلمات الرسالة فوق الرموز . اما الكلمات تحت الرموز فقصدنا بها إمكانية تحليل خاطيء لمحتوى الرسالة لدى المستقبل ، إذ قد يحدث اننا لن نتلق الرسالة إلاّ بدءاً من رمز البيت ٠ ٠ ٠ ١ ١ وأن الصفر الأخير منه لم يرسل بسبب ما ، لذا انحطت الكلمة الأولى وفق رموزنا على أنها ( الرجل ) ، إلاّ اننا نلاحظ بعد ذلك أن الرسالة سرعان

ما استعداد صحتها . ليس من الضروري أن نعرف المقطع حيث بدأت الرسالة حتى يتسنى لنا تحليلها بشكل صحيح ، إلا إذا كانت الرموز من نفس الطول .

إذا نظرنا إلى الوراء قليلاً نجد أننا حققنا أهداف هذا الفصل . فقد توصلنا إلى قياس المعلومات التي يولدها مصدر مستقر وهو قياس منسوب لكل رمز أو لكل ثانية من الزمن ، وأوضحنا كيف أن هذا القياس يكافئ القيمة الوسطية لعدد الأرقام الثنائية اللازمة لبت الرسائل التي تنبثق من المصدر المذكور ، كما رأينا أن تحقيق الرسائل باستخدام ما يزيد عن الانتروبي يجرء طفيف من البيت ، يوجب أن نرسم الرسائل التي يولدها المصدر في تركيب طويلة ، ولا تقتصر على اعتبارها سلسلة من الرموز التفصيلية .

رب سائل يقول : ما هو الطول المفروض والممكن للتركيب ، نعود هنا إلى اعتبار آخر . هناك سببان رئيسيان للترميز ، وفق التركيب الطويلة ، أما السبب الأول فهو أن نجعل القيمة الوسطية المستخدمة في طريقة هوفمان لعد الأرقام الثنائية المقابلة لكل رمز أكبر بقليل من الانتروبي محسوبة لكل رمز ، في حين يتعلق السبب الثاني بتأثير الرموز السابقة على احتمال ظهور رمز معين سيما عندما نواجه موضوع الترميز الفعال للنصوص اللغوية . رأينا أن ذلك ممكن من حيث المبدأ باستعمال التركيب الطويلة والعلاقة الخاصة بحساب الانتروبي لكل رمز .

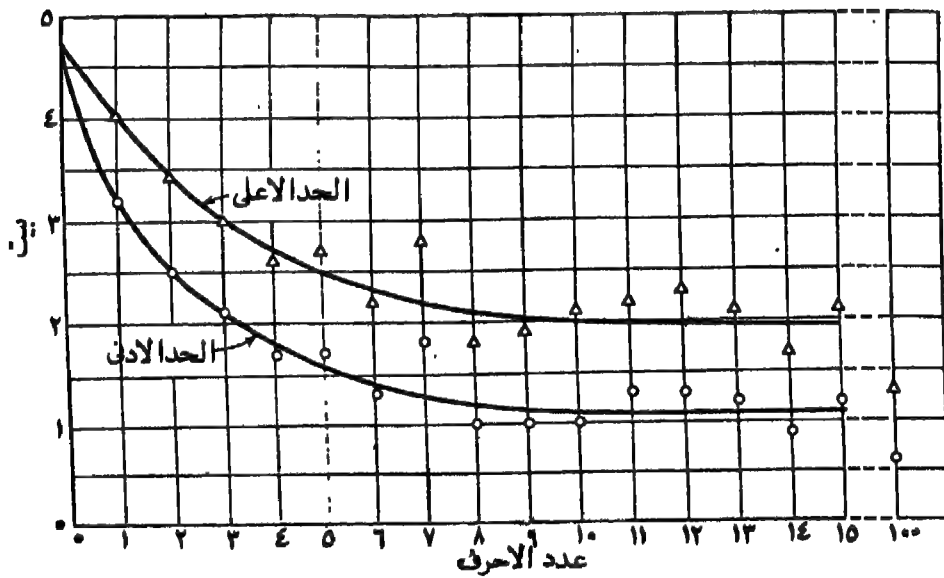
نطرح ، إذن ، السؤال مرة أخرى ، ولكن في صيغة جديدة :

كم عدد الرموز التي يجب أن يحتويها كل تركيب بحيث يتحقق الشرطان :

١ - ترميز هوفمان له كفاءة عالية . ٢ - إذا اعتبرنا الانتروبي لكل تركيب باهمال علاقات التركيب مع ما يقع خارجه ، فإن هذه الانتروبي يجب أن تكون قريبة جداً من حاصل ضرب العدد في الانتروبي لكل رمز . إذا كنا بصدد النصوص اللغوية ، فإن الشرط الثاني هو الأكثر أهمية .

حسب شانون الانتروبي لكل حرف في حالة النصوص الانكليزية بقياس قابلية شخص ما لتخمين الحرف التالي من النص بعد رجوعه الى الحرف الاول والثاني والثالث ... الخ مما سبق من الاحرف. استندت تلك النصوص بالطبع الى الابجدية الانكليزية المؤلفة من ٢٦ حرف مع فراغ اضافي .

يوضح الشكل ٥ - { الحدين الادنى والاعلى الانتروبي للنصوص الانكليزية بدلالة الاحرف التي اطلع عليها الشخص المعني قبل إصدار حروقه المنتظر .



الشكل ٥ - {

ينخفض المنحني بشكل ملحوظ بين العددين ١.٥ - ١.٠٠ اللذين  
يشيران لعدد الأحرف ، بينما يهبط ببطء بين العددين ١.٠ - ١.٥ ، يؤكد  
ذلك أن الترميز الفعال لنصوص اللغة الانكليزية يقضي استخدام تراكيب  
لا تقل أطوالها عن ١٠٠٠ حرف .

تعطينا قراءة الشكل ٥ - ٤ قيمتين هما ٠.٦ ، ١.٣ بيت لكل حرف ،  
تنحصر بينهما انثروبي النصوص الانكليزية . دعونا نفرض القيمة ١ لتلك  
الانثروبي ، فنحتاج اذ ذاك الى ١.٠٠ عدد ثنائي لترميز تراكيب مؤلف  
من ١٠٠ حرف . يعني هذا ان هناك  $2^{100}$  سلسلة ممكنة من التراكيب  
الانكليزية يحتوي كل منها على ١٠٠ حرف . والاعطاء فكرة عن حجم  
العدد  $2^{100}$  نقول انه يساوي تقريبا واحد متبوع بـ ٣٠ صفر ، يا له من  
عدد هائل .

يقودنا البحث من احتمال ورود كل التراكيب ذات المعنى المؤلف كل  
منها من ١٠٠ حرف من الابجدية الانكليزية ، الى حساب التواترات  
النسبية لكل تراكيب ، إلا أننا سرعان ما سندرك استحالة هذه العملية  
عندما نعلم أن هناك تقريبا من هذه التراكيب  $2^{100}$  تراكيب مختلف .

إلا أن ذلك مستحيل أصلاً من حيث المبدأ ، فمعظم التراكيب  
المعدودة من أصل  $2^{100}$  تراكيب لم تكتب بعد ، ولما ان العدد  $2^{100}$  لا يشمل  
فعلاً كل التراكيب ذات المعنى . تؤكد بالتالي استحالة الحديث من  
التواترات النسبية والاحتمالات الخاصة بهذه التراكيب وفق ورودها  
في النصوص الانكليزية .

تواجهنا هنا معضلتان : ما هي دقة توصيف النصوص اللغوية  
باعتبارها ناتج مصدر مستقر ، وما هي الخصائص الاحصائية الاساسية  
لذلك المصدر . قد نميل الى الاعتقاد بوجود احتمالات مناسبة لدى  
الانسان حتى إذا لم يكن تقييماً ممكناً بتفحص النصوص المكتوبة . او

لربما ان تلك الاحتمالات موجودة فعلاً وان معرفتها ممكنة ليس من خلال الطريقة البدائية لحساب احتمالات ورود سلاسل الأحرف ، بل باتباع أسلوب آخر أكثر نجاعة . لقد استعرضنا علاقات مختلفة لحساب الانتروبي في حالة المصدر المستقر وحالة الآلة المتناهية الحالات ، كما عرجنا في نهاية الفصل الثالث على فكرة اعتبار الإنسان في حالة معينة وانتاجه تبعاً لذلك لرمز أو كلمة ، وراينا ان مثل هذه الفكرة جديرة بالاهتمام فعلاً .

يعارض بعض اللغويين بحجة ان القواعد اللغوية لا تتفق وخرج الآلة المتناهية الحالات . نعتزف في هذا الصدد أنه لفهم بنية النصوص اللغوية والانتروبي الخاصة بها ان نتمق أكثر في دراسة النصوص اللغوية مما فعلناه حتى الآن .

ان تطبيق نظرية رياضية بشكل مباشر ميكانيكي على حقول الافتراضات المجردة التي انبثقت عنها تلك النظرية ، هو عمل على جانب كبير من الأمان وفي غاية المهارة . بينما علينا ان نلتزم أكثر بالحكمة والتعقل عند تطبيق نظرية رياضية على أمور واقعية ، مهما كانت تلك النظرية جيدة ومناسبة . اذا رغبنا فعلاً بربط النصوص اللغوية بنظرية الاتصالات وإنجاح هذا الربط أكثر ما يمكن ، فعلى ان نسعى الى أشكال بسيطة وواقعية للقوانين الحاكمة لتلك النصوص . تنطوي تلك القوانين بالطبع على قواعد اللغة ، وسنستعرض تلك القواعد في الفصل القادم .

وفي كل الأحوال ، فإننا نعلم معلومات إحصائية جيدة عن النصوص اللغوية ، كتواتر الكلمات والأحرف ، كما تؤهلنا نظريات الترميز للاستفادة من كل تلك المعلومات .

اذا رمزنا النصوص الانكليزية حرفاً بحرف ، غاضين النظر عن التواترات النسبية للأحرف يلزمنا عندها ٢٦ رقم ثنائي لكل حرف ، ونعتبر الفراغ في هذه الحالة حرف ، بينما اذا كررنا نفس العملية

أخدين بعين الاعتبار التواترات النسبية للأحرف ، يصبح الرقم المذكور ٤٠٠٣ رقم ثنائي لكل حرف . أما إذا رمزناها كلمة بكلمة وفق التواترات النسبية للكلمات نحتاج لـ ١٠٦٦ رقم ثنائي لكل حرف ولقد استطاع شانون باستخدام طرق مبدعة تحديداً لانتروبي للنصوص الانكليزية بين العددين ٠٦ - ١٣ بيت لكل حرف ، ونأمل بذلك أن نلتقي ترميزاً أكثر فعالية .

إلا أن اندفاعنا بشكل ميكانيكي في اتباع طريقة معينة حتى نهايتها لحساب الانتروبي ، قد يضعنا في مواجهة صعوبات كبيرة ويضيع جوهر بحثنا . وإذا حدث ذلك فيعود بشكل جزئي إلى الفروق بين الإنسان كمصدر للنصوص اللغوية وبين نموذج المصدر المستقر الذي درسناه ، وأما السبب الجزئي الآخر فهو طريقة التناول غير الملائمة . إن نموذج الإنسان كمصدر مستقر للنصوص هو نموذج جيد ومقيد إلا أنه ليس كاملاً بالطبع ، لذا نقيم عالياً هذا النموذج .

لقد كان هذا الفصل طويلاً وغنياً بالتفاصيل ، ويحتاج قبل إنهائه إلى عرض موجز . لن نستطيع بالطبع تلخيص كل ما قدمناه ، فقد احتاج ذلك التقديم إلى صفحات كثيرة . لذا سنكتفي بالتركيز على النقاط الهامة وحسب .

تقدر الانتروبي الخاصة بكل إشارة في نظرية الاتصالات بالبيت لكل رمز أو لكل ثنائية وهي تعطي القيمة الوسطية لعدد الأرقام الثنائية لكل رمز أو لكل ثنائية ، الضرورية لترميز رسالة ينتجها مصدر ما .

نتصور مصدر الرسائل على أنه يختار بشكل عشوائي ، أي بشكل غير قابل للتنبؤ ، رسالة من بين رسائل متعددة ممكنة . لذا نربط الانتروبي في حالة المصدر بمقدار الخيار الذي يمارسه المصدر في انتقاء رسالة معينة ستبث فعلاً .



أما عن المستقبل ، فنفرض أنه قبل استلامه للرسالة سيكون غير أكيد فيما يتعلق بالرسالة التي سيولدها المصدر ويرسلها إليه . بناء على ذلك، ننظر الى انتروبي مصدر الرسائل كمعيار لريبة المستقبل حول الرسالة التي ستصل ، وهي ريبة ستحل عند استلام الرسالة .

إذا تم اختيار الرسالة من بين عدد من الرسائل متساوية الاحتمال كان الانتروبي لع ن ، حيث أن هو عدد الرسائل الممكنة . ويبدو هذا التعريف طبيعياً للغاية ، لأنه إذا توفر لدينا عدد من الأرقام الثنائية يساوي لع ن ، لتمكنا من استخدامها في كتابة مجموعة من الأعداد الثنائية تضم :

$$ل\text{ع ن} = 2^n \text{ عدداً ثنائياً .}$$

وسنربط الرسالة المولدة بأحد هذه الأعداد . أما إذا لم تكن الرموز متكافئة الاحتمال ، وهي الحالة العامة ، فتعطي الانتروبي وفق أول علاقة عرضناها في هذا الفصل . إذا اعتبرنا تركيباً طويلاً من الرموز ، لا يعتمد محتواه الا قليلاً على ما سبقه من الرموز ، ونظرونا إليه كرمز جديد ، فيمكننا تعديل العلاقة المذكورة لنحصل على انتروبي المصدر لكل رمز ، حيث يعتمد اختيار رمز معين على الرموز التي سبق وجرى اختيارها . تفسح هذه الأفكار المجال لنا لاستنتاجات علاقات أخرى خاصة بالانتروبي كانت في عداد مواد هذا الفصل .

إذا استخدمنا طريقة هوفمان في الترميز ، وهي طريقة ذات كفاءة عالية ، نستطيع أن نبرهن أن انتروبي المصدر المستقر مقاسة بالبيت تساوي القيمة الوسطية لعدد الأرقام الثنائية اللازمة للترميز .

قد لا تمر قناة اتصال نموذجية الأرقام الثنائية ، ويمكن أن تحمل الأحرف أو الرموز الأخرى . نتصور أننا وصلنا عدة مصادر الى مثل هذه القناة ، وبحسبنا بعد ذلك بوسائل رياضية عن المصدر الذي سيجعل

من انتروبي الرسالة العابرة للقناة أكبر ما يمكن . نستطيع تعريف سعة قناة الاتصال النموذجية استناداً لما تقدم ، ونعني بالقناة النموذجية القناة الخالية من الأخطاء ، تعطى سعة هذه القناة بأكبر انتروبي لرسالة يمكن أن تمررها القناة . يمكن البرهنة على أنه إذا كانت انتروبي المصدر أقل من سعة القناة فإن القناة في هذه الحالة تمرر رسائل المصدر المرمزة . تعرف هذه بنظرية شانون الأساسية للأقنية الخالية من الضجيج .

تمكننا العلاقات الواردة في هذا الفصل من حساب انتروبي المصدر بواسطة التحليل الاحصائي للرسائل المنبثقة عنه ، إلا أن ذلك قد يستدعي حسابات طويلة حتى في حالة المصادر المستقرة . أما في حالة المصادر الفعلية كالنصوص اللغوية ، فإن الوصفات الأولية لحساب الانتروبي تبدو لا معنى لها .

يتحقق الحساب التقريبي لقيمة الانتروبي بإهمال أثر الرموز السالبة على احتمال اختيار المصدر للرمز التالي ، وتكون القيمة التقريبية الناتجة عادة أكبر وتستدعي الترميز باستخدام عدد من الأرقام الثنائية أكثر مما يلزم . وهكذا إذا رمزنا النصوص الانكليزية حرفاً بحرف بصرف النظر عن الاحتمالات النسبية للأحرف ، نحتاج إلى ٧٦٫٤ رقم ثنائي لكل حرف ، أما إذا رمزناها كلمة بكلمة ، آخذين بعين الاعتبار الاحتمالات النسبية للكلمات لاحتجنا إلى ١٦٫١ رقم ثنائي لكل حرف .

وإذا رفعنا برفع مستوى ادائنا لاعتبرنا الميزات الأخرى للغة كتأثير القواعد اللغوية مثلاً على احتمال توليد المصدر لكلمة معينة .

على الرغم من أننا لا ندرى طريقة معينة يمكن بواسطتها ترميز النصوص الانكليزية بأكثر ما يمكن من كفاءة ، فقد أجرى شانون تجربة مبدعة أثبت بموجبها أن انتروبي النصوص الانكليزية تتراوح بين ١٫٦ إلى ٣٫١ بيت لكل حرف . انطوت هذه التجربة على تحزير شخص معين عن الحرف التالي في نص مكون من عدد كبير من الأحرف .

## الفصل السادس

### اللفظة والمعنى

يتلخص الانجازان الكبيران لنظرية المعلومات بتعريف وحساب استطاعة القناة وعلى الاخص تحديد عدد الأرقام الثنائية اللازمة لارسال المعلومات من مصدر معين ، وكذلك أن سرعة المعلومات عبر قناة مشوبة بالضجيج يمكن أن تأخذ كل القيم المتزايدة طالما أن الارسال يحدث دون اخطاء رغم وجود الضجيج ، تقدر هذه السرعة بالطبع بالبيت لكل حرف أو البيت لكل ثانية يجب أن تثبت كل النتائج وفي كل الاحوال للمصادر والاقنية المتقطعة وكذلك المستمرة .

لقد استغلنا مرحلة اعداد طويلة في الفصول الأربعة الأولى أصبح بمقدورنا بعدها وفي الفصل الخامس طرح مشكلة عدد الأرقام الثنائية اللازمة لارسال المعلومات المولدة عن مصدر مستقر فعلي . لو كان هذا الكتاب مجرد كتاب مدرسي عن نظرية المعلومات ، لانتقلنا اذن الى المرحلة المنطقية التالية ، وهي القناة المشوبة بالضجيج ومن ثم القناة المستمرة والمستقرة .

الا أن أفكارنا سرعان ما ستعود عند نهاية هذه العملية المنطقية المتقدمة الى اعتبار مصادر الرسائل في العالم الواقعي ، والتي يمكن وصفها بتقريب ما على أنها مستقرة ومن ثم حساب الانتروبي الخاصة بها . والبحث عن أكثر الطرق كفاءة في ترميز الرسائل الصادرة عنها .

ونحن بدورنا سنتوقف هنا عن الاسترسال في الشروح الرياضية لنظرية الاتصالات ونتناول أكثر ادوات الاتصال تشويقاً وجاذبية ، نعني اللغة ، ولكن من منظور نظرية الاتصالات . اذ يحق لنا وقد علوفا قمة من قمم المعرفة المتواضعة ان ننظر منها الى جانب هام من حياتنا ، وأن نتبين فيما اذا كانت مشاكل اللغة والمعنى ستبدو مختلفة في اطار ما تعلمناه .

نطلب من القارئ العزيز ان يكون حذراً في هذا السياق . لقد كان تركيزنا حتى الآن على ما نعرفه ، وما نعرفه هو النواة الصلبة للعلم . يجد العلماء صعوبة بالغة في مشاركة الانسان العادي بما يعرفونه . اعتقد بناء على ذلك ان الاحاطة بالمعارف العلمية تقتضي جهوداً جبارة كتلك التي بذلها القارئ عبر الفصول القليلة السابقة .

على ان هناك جانباً أبسط وأكثر امتاعاً للعلم . انه ذاك الضرب من الجهل المعلن . يختلف جهل العالم عن جهل الانسان العادي ، ذلك لان الخلفية العلمية لدى العالم والمكونة من النظريات والحقائق المثبتة تبعد عن ميدان تنبؤاته كل الافتراضات والتصورات التي لا معنى لها . اما الشكل الأعلى والحدي من جهل العالم وهو الذي نطلق عليه اسم الجهل المعلن فيشمل أصل الكون والأصول العميقة للمعرفة وعلاقة مستوى المعارف الحالية بالارادة الحرة والأخلاقيات والسياسة . سنحوم في هذا الفصل الخاص حول موضوع اللغة بشكل يمكن ان نطلق عليه من وجهة النظر العلمية انه الجهل المعلن بموضوع اللغة .

نعود فنؤكد ان ما سنعرضه في هذا الفصل ليس أكثر من بنود نابعة من الجهل المعلن ، وهذا التأكيد ضروري للغاية اذ قلما يجد الانسان غير المتخصص وسيلة ناجمة يستطيع بواسطتها التفريق بين الحقيقة العلمية والجهل العلمي . ان الجهل اسهل تمثلاً من العلم ذلك لان الجهل يمكن التعبير عنه بمبارات عريضة شديدة العمومية وجمل ذات كفاءة منخفضة بالمقارنة مع الحقيقة ، ولان الجهل اضافة الى ذلك معنى بالمشاكل غير المحولة فهو أكثر رومانسية . ينتشر الجهل أكثر ويجد له صدى أوسع بالمقارنة مع الحقائق العلمية .

وإذا كان الجهل خطراً بهذا الشكل على الإنسان العادي ، فله موقع مهم لدى العالم ، فمنه يكون العالم الرؤى المحيطة بالعوالم البعيدة والأبعاد غير المنظورة ، وهذا ينزع الاحساس الآني بالراحة والرضى الذاتي لديه ويستحثه لإسراع خطاه على طريق الاكتشاف بدلا من مجرد السير البطيء على ذلك الطريق . عندما يحس العالم بجهله ، فسرعان ما سيخطط لما يتوجب عليه أن يفعله ، في حين أن الإنسان العادي لن يستطيع ذلك وسيتيه في أجواء الجهل الضبابية دون أن يجد أي فرصة لوضع قدمه على أرض المعرفة الآمنة .

نعود الآن الى حيث واجهنا مشكلة اللغة لننطلق من هناك ، بعد أن وضعنا الخطوط العامة لمحاذاير تقدمنا في أرض مجهولة .

سنقتصر فيما يلي من بحثنا على قواعد اللغة الانكليزية . نعرف جميعاً أن اللغة اليومية الدارجة لا تخضع لقواعد اللغة ، مثلما مؤلفات غير ترود شتاين . ويظهر الخروج عن قواعد اللغة خاصة في المحاضرات العلمية والتكنيكية . يذهب المغالون في الالتزام بقواعد اللغة حد رفض كثير من الأشعار الجيدة ، بحجة عدم موافقتها لتلك القواعد .

لذا فإن استعراض قواعد اللغة لا يعني تغطية كل الجمل المنطوقة أو المكتوبة وجل ما يفعله هو أنه يرسي مساراً إجمالياً يمكن أن تتبعه باهتمام وبشكل منظم .

عرفنا فيما سبق أن كتابة أي نص لغوي يجب أن يخضع الى عدد من القيود . يمكن أن نجد تفاصيل كل تلك القيود في كتاب متكامل عن قواعد اللغة . تفند تلك القواعد الاحكام اللازمة لإنشاء أي سلسلة من الكلمات التي سيتم قبولها في وقت معين ووفق معيار معين على أنها منسجمة مع القواعد .

ان قضية قبول الإنشاء اللغوي من وجهة نظر القواعد هي قضية شائكة وغير واضحة المعالم ، فكثيراً ما تقبل مخالفات للقواعد وفق المؤلف

ووفق منزلة الكتاب وغالباً ما تكون نفس المخالفات غير مقبولة اذا استخدمت في مجالات اخرى . وبصورة عامة يتغير ما هو مقبول بالنسبة للقواعد بشكل مستمر . قصدنا بذلك مجرد الملاحظة وننتقل الآن الى مواضيع اخرى .

تتضمن القواعد مجموعة من الاحكام المسبقة التي تسمح بالإنشاء اللغوي الاصولي ، اي الإنشاء الخاضع لتلك الاحكام وحسب . والى جانب ذلك فلهذه الاحكام مهمة اخرى ، اذ بواسطتها نتمكن من تمييز كل الجمل والمقاطع المتفقة مع تلك الاحكام والواردة في نص معين ، من الجمل والمقاطع الاخرى غير المتفقة معها .

اذا استطعنا الاحاطة بتلك الاحكام كان بإمكاننا اجراء تقييم جديد لانتروبي النصوص الانكليزية ، اذ نميز في هذه الحالة الأجزاء التي هي عبارة عن تطبيق ميكانيكي ومباشر للقواعد والأجزاء الأخرى التي تنطوي على خيار أو ريبة وتساهم بذلك في الانتروبي . ونستطيع ، أكثر من ذلك ، بث الرسائل اللغوية بشكل فعال بأن نحمل الرسالة المعلومات المتعلقة بالخيارات الممارسة أثناء الإنشاء ، ونستخدم عند المستقبل آلة قواعد خاصة تعيد انشاء الجمل وفق أصول القواعد استناداً للخيارات المدرجة في الرسالة المستقبلية .

ليست احكام القواعد هي كل شيء في اللغة ، فقد تبدو جملة ما في منتهى الغرابة رغم خضوعها الكامل لاحكام القواعد . يمكن لآلة انشاء لغوية لتقمت كل القواعد بكل تفاصيلها ، أن تتركب جملة مثل : اكل الخبز الخبز . اذ أن كل ما تفعله الآلة هو جملة من الخيارات بين الكلمات آخذة بعين الاعتبار القواعد اللغوية ، أما الانسان فيبني خياراته بشكل مخالف ، اذ أن الكاتب يتبع احكام القواعد ، الا انه يجري خيارات أخرى أيضاً . ان فهم القواعد لن يكشف لنا كل اسرار اللغة ، الا انه سيدفعنا خطوة الى الامام على الطريق الصحيح .

ما هو نوع الاحكام التي ستمخض عن جمل سليمة من وجهة نظر القواعد ، وعن كل الجمل بشكل عام ، حتى لو كانت الخيارات عشوائية . رأينا في الفصل الثاني كيفية انتاج نصوص شبيهة بالنصوص الانكليزية وذلك باختيار كلمة عشوائياً وفق احتمال ورودها بعد سلسلة معينة ومحددة الطول من الكلمات ، وكان مثالنا حين ذاك التقريب الثاني الذي ترد وفقه الكلمة على اساس الكلمة السابقة لها .

يمكن لاي منا انشاء تقريبات اعلى باستخدام المعارف اللغوية المختزنة في دماغه ، وهكذا يستطيع مثلاً تحقيق التقريب الرابع باعتباره ثلاثة كلمات متتالية وعرضها على شخص آخر لاضافة كلمة رابعة والحصول على جملة ، وبتكرار هذه العملية والانتقال من شخص لشخص قد نحصل على مقطع مثل : حدث ذلك في منظر ضبابي للأشجار المترنحة بهدوء على الجسر .

بعد هذا المقطع معقولا بكيفية ما لان اختيار الكلمات لم يتم بشكل عشوائي وانما أجرته كائنات عاقلة . والشيء المدهش في مثل هذا المقطع ملائمته لاحكام القواعد ومنطقيته المقبولة على الرغم من انه انشئ بشكل مطرد بإعطاء الكلمات الثلاثة الأخيرة من الجزء المتكامل منه عند مرحلة معينة والطلب الى شخص ما اضافة الكلمة الرابعة . وعلى الرغم من ذلك فقد نحصل أحيانا على مقاطع غير معتدلة البنية اذا اتبعنا نفس الطريقة ، مثلاً قد نحصل على المقطع : رأيت آخر مرة عندما عاش ، الذي يبدو أيضا غير موائم لاحكام القواعد بشكل كامل .

إذا كان شانون على حق وإذا توفر في النصوص الإنكليزية خيار يكافئ ١ بيت لكل رمز ، فإن الاختيار من بين ٤ كلمات يعني حوالي ٢٢ خيار ثنائي ٢ او خيار بين ١٠ ملايين تركيب في كل تركيب ٤ كلمات . يمكن من حيث المبدأ ان يقوم كومبيوتر بإضافة الكلمات استنادا لمثل هذا الجدول من التراكييب ، إلا ان النواتج لن تكون ملائمة لاحكام القواعد بشكل مؤكد ، اصف الى ان هذه الطريقة الطويلة جداً قد لا تتمخض عن كل

السلاسل الممكنة من الكلمات الخاضعة لأحكام القواعد ، فهناك بعض سلاسل الكلمات التي قد تشكل جزءاً من جملة سليمة وفق القواعد في بعض الأحوال ولا يمكنها تحقيق ذلك في أحوال أخرى . وهكذا إذا لم نضمنها فستأتي النتيجة ناقصة بعض الجمل السليمة وفق القواعد .

أما إذا اعتبرنا التراكيب المحتوية على أكثر من ٤ كلمات ٢ فسنفضل عندها القواعد على الكمال ، ويحدث العكس إذا خفضنا عدد الكلمات في كل تركيب عن ٤ ، إذ عندها ستكون المفاضلة للقواعد على حساب الكمال .  
إننا لن نستطيع جمع الاثنين .

تعاود الظهور ، في هذه المرحلة ، فكرة الآلة المتناهية الحالات . فلربما إننا نستطيع ربط آلة منتجة للجمل اللغوية ، تكون في حالة معينة عند كل نقطة من الجمل وهذا سيسمح لها بإجراء خيارات معينة وفق الحالات التي يمكن أن تنتقل إليها انطلاقاً من الحالة المحددة ، ولربما أن مثل هذه الآلة سيتمكنها التعامل مع أنواع معينة من الكلمات كالاسماء المفردة ، والصفات والأفعال وغيرها وبذات تستطيع إنتاج نصوص لغوية سليمة وفق القواعد وتفسح المجال لتضمين الكلمات فيها بأكثر من ملائمتها لادراج سلاسل الكلمات .

يبدو تشبيه القواعد بآلة متناهية الحالات مشجعاً بصورة خاصة ذلك لأن بعض وجهات النظر للإنسان ترى فيه آلة متناهية الحالات ، ببساطة لأنه يتكون من عدد محدد من الخلايا وبالتالي من عدد محدد من الدورات .

يرفض شومسكي ، وهو لغوي معاصر معتبر ، فكرة الآلة المتناهية الحالات كنموذج ممكن أو ملائم للقواعد اللغوية ، فهو يشير إلى عدد من أحكام انشاء سلاسل الرموز التي تضمينها في مثل هذا النموذج . من هذه الأحكام مثلاً أن نختار على التتالي الأحرف الأبجدية بشكل عشوائي حتى ظهور الحرف Z ثم نكرر بعد ذلك كل الأحرف المدرجة اعتباراً من آخر ورود للحرف Z ولكن بترتيب معاكس ، نتابع بعدها في



مجموعة جديدة من الأحرف وهكذا . ستنجح هذه العملية سلسلة من الأحرف مجسده لنظام مديد ، اضافة الى انه لا يوجد حد لعدد الأحرف المحصورة بين ورودين متتالين للحرف Z . لا تستطيع آلة متناهية الحالات بإمكانها تحقيق مثل هذه العملية .

يؤكد شومسكي انه لا يوجد حد معين لطول الجملة السليمة وفق القواعد في اللغة الإنكليزية ، ويضيف ان جمل اللغة الإنكليزية مرتبة بشكل ينفي دور الآلة المتناهية الحالات كمنتج وحيد لكل نصوص اللغة الإنكليزية . ولكن هل نستطيع فعلا اعتبار جملة طولها كيلو مترات على انها سليمة وفق القواعد سيما واننا علم ان أحدا ما لم ولن ينتج مثل هذه الجملة ، وحتى لو وجدت فستكون غير مفهومة .

ان تقرير مثل هذا الأمر لا يمكن بدون معايير معينة لتقرير سلامة النص وفق القواعد . يشير شومسكي الى ما هو سليم وما هو غير سليم وفق القواعد واعتقد ان معياره يستند الى ضرب من السياقية الطبيعية ، فالجملة حسب شومسكي سليمة وفق القواعد فيما اذا قيلت بصوت عالٍ وتقطيع واضح وأصدر عليها هذا الحكم شخص يتفوه بها او يسمعها ان الأمور التي تقض مضجع الآخرين يبدو انها لا تزجج شومسكي ربما لانه يتحدث لغة إنكليزية متماسكة وسليمة وفق القواعد .

هل يمكن تضمين قواعد اللغة في آلة متناهية الحالات أو لا يمكن ؟ يطرح شومسكي شاهداً مقنعاً على خطأ محاولة انشاء الجمل بجمل الخيار التالي للكلمة تابعاً للكلمات التي سبقت . يستعيز شومسكي عن ذلك برؤية أخرى لإنشاء الجمل هي التالية :

نبداً بشكل أو آخر من عدة نماذج يمكن ان تأتي الجملة وفقها ، مثلاً فعل يتبعه فاعل . يسمى شومسكي هذا الشكل الخاص : الجملة الاساسية ، ثم يستحضر احكام القواعد لتوسيع كل جزء من اجزاء هذه الجملة ، وقد يصل ذلك به الى جمل مختلفة مثل : قذف الرجل الكرة ، او : امسكت الفتاة القطة .

نلاحظ هنا ان فعل الخيار لم يمارس بشكل متسلسل عبر الجملة من بدايتها الى نهايتها ، بل تم اعتماد هيكل عام او مخطط عام للجملة النهائية منذ البداية ، هذا المخطط هو الجملة الاساسية الذي نعبه الى اركانه المختلفة حيث يتم اختيار الكلمة المناسبة وفق كل ركن . ينحصر الخيار هنا عند كل عقدة من هذا الهيكل الاشبه بشجرة والذي تقع الجملة الاساسية منه عند الجذر .

لقد شرحت افكار شومسكي هنا بشكل غير كامل ووفق خطوطها العامة . فمثلا لدى اعتباره بعض اشكال الكلمات غير النظامية يحدد شومسكي اولا الكلمة الاساسية وشكلها الإعرابي العام ، ثم يطبق بعض الاحكام الإجبارية لبلوغ الشكل اللغوي الصحيح . وهكذا فإنشاء شومسكي المتفرع للجملة يعتمد بعض الاحكام الاختيارية التي تسمح بإجراء الخيار الحر الى جانب احكام اجبارية اخرى لا تسمح بأي خيار .

ان الفهم المفصل لشومسكي يقع خارج اهداف هذا الكتاب ويمكن الرجوع الى كتابه حول هذا الموضوع والمراجع الاخرى التي يشير اليها في كتابه .

ان على شومسكي ، طبعا ، ان يعالج مشكلة الجمل الغامضة ، مثل الجملة التالية : السيدة العالمة جعلت الروبوت أسرع خلال الوقت الذي اكلت به . لقد ابلغني مؤلف هذه الجملة ، وهو باحث في نظرية المعلومات ، ان هذه الجملة تحمل اكثر من ٤ معاني مختلفة في إطار اللغة العلمية . ان هذه الجملة صعبة للغاية اذا اختيرت كنموذج للدراسة والتحليل .

قد نعتقد ان مرد الغموض هو المعاني المختلفة التي قد يقطعها كلمة او اكثر ضمن نفس الإنشاء الإعرابي ، كقولنا مثلا : كان مجنوننا ، بمعنى انه كان غاضبا او انه كان قد فقد عقله فعلا ، او قولنا : كان الطيار عالياً ، بمعنى انه خلق بطائره على ارتفاع عالٍ ، او كان عالياً في رده على استشاره ما . يعطي شومسكي مثالا بسيطا عن جملة غير واضحة تماماً ،

وسبب عدم الوضوح فيها هي احكام القواعد ، والجملة هي ؛ صيد الصيادين ، وقد تفسر بمعنى الصيد الذي يجلبه الصيادون ، أو بمعنى آخر هو ان يقوم البعض بصيد الصيادين ، أي جمل الصيادين من جملة فرائسه .

يؤكد شومسكي أن تطبيق احكام تحويل مختلفة على جمل أساسية مختلفة يمكن أن يؤدي الى نفس السلسلة من احكام القواعد . مثلاً ، اذا اعتبرنا الجملة : اللوحة تم رسمها بواسطة فنان حقيقي ، اللوحة تم رسمها بواسطة أسلوب جديد ، نلاحظ التقابل الإعرابي الدقيق بينهما ، إلا أن الأولى يمكن أن تنتج من تحويل الجملة التالية : لقد رسم اللوحة فنان حقيقي ، أما الثانية فلا يمكن استنتاجها من جملة لها نفس الشكل . عندما تكون الكلمات النهائية والعناصر الإعرابية النهائية نفسها ، تكون غامضة .

يواجه شومسكي المشكلة الكبيرة بأن الحدود الفاصلة بين السلامة وفق الإعراب وبين صحة المعنى هي حدود غير واضحة . مثلاً : الجملة : الأخضر عديم اللون ، هي جملة سليمة وفق الإعراب ولا معنى لها . هل يمكن للقواعد أن تمنع ربط بعض الصفات ببعض الأسماء أو بعض الأسماء ببعض الأفعال وغير ذلك ؟ فوفق خيار ما تكون التراكيب سليمة وفق الإعراب وعديمة المعنى ، وفي خيار آخر تصبح غير صحيحة من وجهة نظر الإعراب إلا أنها تؤدي معنى مفيداً .

وهكذا وضع شومسكي مخططاً لقواعد اللغة الإنكليزية يتضمن عند كل تفرع في عملية إنشاء الجملة خطى إجبارية وأخرى اختيارية . لا يمكن تنفيذ مثل هذه الخطى باستخدام الآلة المتناهية الحالات ، إلا أنه باستطاعة آلة أخرى فعل ذلك ، تعرف هذه الآلة بآلة تيوريثغ وهي آلة منتهية الحالات أضيف إليها شريط تسجيل يمكن قراءة الرموز وكتابتها عليه ، وكذلك محيطها . تشكل العلاقة بين قواعد شومسكي وهذه الآلة مادة للدراسة في علم معاصر يعرف باسم الأتمتة .

يجدر بنا ان نلاحظ أننا إذا فرضنا حداً أعلى لطول الجملة بالغا ما بلغ من الكبير ، كان نجعله مساوياً لآلف أو مليون كلمة ، فإن قواعد شومسكي ستبقى متناسبة مع الآلة المنتهية الحالات . ان فرض حد أعلى لطول الجمل يبدو معقولا من الناحية العملية .

بعد ان يتم وضع مخطط عام أو نموذج لقواعد كذلك الذي اقترحه شومسكي ، يبرز السؤال الهام : كيف يمكن تقدير الانتروبي وتحت أي ظروف ، تلك الانتروبي التي تقيس الخيار أو الرتبة لمصدر رسائل يولد النصوص اللغوية وفق أحكام القواعد المعتمدة . يخص هذا السؤال الرياضي الحاذق العامل في مجال نظرية المعلومات .

لعله امر بالغ الاهمية ان نصيغ احكاما للقواعد معقولة وقابلة للعمل وفقها يمكن ان تكون تلك الاحكام ما اقترحه شومسكي تحت اسم : قواعد الانشاء باستخدام اجزاء الجمل ، او يمكن ان تكون متضمنة في اقتراحات مناسبة اخرى . يحتمل ان تكون تلك القواعد غير كاملة اذا هي فشلت بانتاج او تحليل التراكيب الواردة والمقبولة وفق القواعد اللغوية المعروفة ومما هو اكثر اهمية ان عمل هذه الاحكام يجب ان يتناسب مع الانشاء اللغوي الذي ينجزه كائن بشري ، وان يكون بسيطا لدرجة يمكن معها للكمبيوتر ان يقوم بتوليد وتحليل النصوص . اعتقد ان استخدام الكمبيوتر ضروري في تناول مشاكل النصوص اللغوية سواء من حيث انشائها او مواصفاتها الاحصائية .

يتناقض الدارسون في مواقفهم من انجازات شومسكي ، فبعضهم يرى فيها الجانب الأهم من قواعد اللغة الانكليزية بينما يشعر الآخرون ان طريقته في توليد الجمل يجب ان تعدل او ربما تحدد فيما اذا تم التخطيط لاستخدامها في التوليد الفعلي للجمل المنتجة من قبل بني البشر يفهم الانسان شعور قوي ، لدى استماعه الى متحدث آخر او قيامه بالحديث هو نفسه ، بأن الجمل تنبثق بشكل متماسك من البداية وحتى النهاية ، واكثر من ذلك فان لدى كل منا الانطباع بأن كائناً بشرياً من كان

لا ينتج جملة بتطبيق آلية جاهزة في دماغه لدى تفوهه او كتابته كل كلمة ،  
وعوضا عن ذلك يتعامل مع تلك الآلية بشكل عفوي وعبر سياق انتاجه  
للنصوص اللغوية .

لا اعتقد ان الدراسات المنصبة على اللغة والقواعد والاحصائيات  
المتعلقة بهما ستعطينا في المستقبل القريب معلومات جديدة عن طبيعة  
اللغة والانسان . واذا رغبت بقول ما هو اكثر خصوصية من ذلك ،  
فعلي تجاوز المعارف الحالية ، سواء اكانت معارفي او معارف الآخرين .

لا يقتصر عمل القواعد على بسط الاحكام النازمة لعملية ضم الكلمات  
الى بعضها بهدف تكوين جمل مفيدة ، بل يتعدى ذلك الى تصنيف  
الكلمات . في زمر مختلفة وفقا للاماكن التي يمكن ان تظهر . عندها في  
النصوص المنشأة على اساس تلك القواعد يعد اللغويون مثل هذا  
التصنيف استنادا الى القواعد الصرفية ودون استخدام مفهوم لمعنى .  
وهكذا فكل ما نتوقعه من القواعد بناء جمل صحيحة من حيث الشكل ،  
وهذا يشمل الجملة التالية مثلا : نزل المطر على الارض باستخدام المصعد  
ان تضيف الكلمات وفق القواعد الى اصناف مختلفة مثل الاسماء ،  
الصفات ، والافعال ، ليس اطلاقا دليلنا الوحيد لانشاء النصوص  
اللغوية .

ماذا يحكم اختيار الكلمات عند انشاء جمل سليمة وفق القواعد ،  
ولا نقصد هنا الانشاء المنفذ من قبل آلة ، بل ذاك المنطوق بكائن بشري ،  
والذي تعلم من خلال خبرته الطويلة الكتابة والحديث وفق اصول  
القواعد . لا يمكن الاجابة عن هذا السؤال بالجواب الى مفهوم المعنى دون  
تمحيص كاف ، اذ ان المعايير المستخدمة في انشاء النصوص اللغوية هي  
معايير معقدة للغاية . لقد درس الفلاسفة وعلماء النفس استخدام  
الكلمات واللغات لاجيال متعاقبة واقاموا حولها النظريات ، ولكن يبدو  
ان استنتاج اي مقولة جديدة في هذا المجال هو امر صعب ناهيك عن  
امكانية ان تكون تلك المقولة صحيحة على الاطلاق . نجد في كتابات  
الاسقف بركلي من القرن الثامن عشر المتعلقة باستخدام اللغة آراء مقولة

يصعب على الباحث تقديم آراء جديدة دون العودة اليها وايغالها حقها  
كاساس في ابحاث اللغة .

يجد الشاعر الاصيل صعوبة بالغة في نظم شعره ، فعليه من جهة  
انتقاء الكلمات ذات الجرس الموسيقي المقبول والتي تؤدي المعاني المطلوبة .  
الى جانب حفاظها على الوزن والقافية المعتمدين . لذا لا يمكن ان تقسم  
كلل الاشعار وفي نفس السوية فمنها ما يحقق الاتباع المطلوب الى جانب  
الوزن والقافية ، بينما يخلو في نفس الوقت من أي معنى .

ان انتقاء الكلمات ذات الجرس الموسيقي يتجاوز الشعر الى انواع  
الكتابات الاخرى ، خاصة اذا قصد الكاتب التأثير بشكل ما على القارئ ،  
وقد يعتمد بعض الكتاب لاستخدام كلمات معينة ، بغية تحقيق هذا  
الهدف كالخوف والحقد والحب وغيرها . تحرك كلمات مختلفة مشاعر  
كل منا في ظروف متباينة ، ويتعدى فعل الكلمات في بعض الثقافات  
الافراد الى المجموع ، اذ تؤثر فيهم جمل ومقاطع محددة ، تماماً كما  
تؤثر فيهم احداث متكررة او اصوات او مشاهد ذات مغزى .

لم يذكر بركلي نوعاً معيناً من الانفعال هو الانفعال المرتبط بالفهم  
وعملية المعرفة . ان تفوهنا بنماذج دارجة ومتعارف عليها من الكلمات  
في معرض مواجهتنا لبعض القضايا الغير واضحة ، يمكننا من ربط  
انفعالاتنا الاليفة النافذة مع ارتباطنا وحيرتنا ازاء الحياة ، التاريخ ،  
طبيعة المعرفة ، الوعي والموت واضح ان هذه الفلسفة تعتمد الكلمات  
المتداولة لذا فان تقييمها يجب ان يستند الى اهمية مصداقية الشاعر  
الانسانية باكثر مما تستند الى مفهوم المعنى في اللغة .

يمكن ان يقضي احدنا اياما بكاملها في تفحص امثلة عن دوافع انتقاء  
الكلمات ، الا انه سيعود الى مشكلة المعنى على الدوام ، فكل شيء يبدو  
ضائعا بدون المعنى مهما كان ذلك المعنى لا يملك الشعر الصيني او النكتة  
الصينية الا اثرا ضئيلا علي الا اذا كان بإمكاننا ان اتفهم اللغة الصينية  
بنفس الطريقة والالية اللتين يتعامل الصينيين بهما مع لغته .

اعتقد انه من المناسب ان نعتبر اللغة نوعا من رموز الاتصال على الرغم من اعتراض كولين شيري ، وهو باحث في نظرية المعلومات ، ان ذلك لا يعني ان اللغة هي نظام رموز سهل يتم وفقه وببساطة استبدال الفعل بالكلمة ، انها اشبه بأساليب الترميز القديمة حيث كانت تعتمد قائمة من الكلمات تصلح كل منها لترميز كلمة معينة أو حرف محدد ( وذلك لمنع التكرار ) مرة أخرى ليست اللغة ببساطة هذه الأساليب ، فقوائمها تتداخل بعكس أساليب الترميز القديمة ، كما ان القاموس اللغوي لأي شخص يختلف عن القاموس اللغوي لأي شخص آخر ، مما يزيد في الارتباك والتشوش اذا اعتبرنا ان اللغة هي نظام ترميز غير كامل ، فعملينا ان نعزو المعنى في نهاية المطاف الى الشخص ، ولهذا السبب ، ربما ان بعضنا يطرح السؤال التالي : ماذا تعني ، على الرغم من سماعه كلام الشخص الآخر بوضوح . يسمى الدارسون في هذا السياق ، لفهم مقاصد كتاب الذين قضوا منذ وقت طويل ، كما تسعى المحاكم لاستيعاب مقاصد الجهة المشرعة قبل استخدام النصوص القانونية .

لنفرض جدلا أنني اقتنعت بكذب احد الأشخاص عندها احمل كلماته معان يحاول من خلالها تملقي او خداعي . بينما اذا اكتشفت ان الكمبيوتر استطاع صياغة جملة مفيدة استنتج على الفور ان الكمبيوتر يعمل بشكل جيد .

لا اظن ان مناقشتنا هذه هي من قبيل المحاكمة ، اذ ان ما يدفعنا الى هذه الاعتبارات عن المعنى ، افتراضنا الاول بان اللغة هي جملة ترميز للاتصالات غير كاملة ، وتستخدم في بعض الاحيان بشكل غير نسيقي . اما الأمر الاكيد ، فهو اننا ما زلنا بعيدين جدا عن الاحاطة الكاملة بهذه القضايا .

وعلى كل حال ، تمتلك الجمل السليمة وفق الاعراب معنى شكلياً بصرف النظر عن النية أو القصد . واذا كان في حوزتنا نظام اعراب مرضي فيمكن للآلة استخدامه لبيان العلاقات بين مكونات الجملة كالفاعل والفاعل

وغيرها ، أما المرحلة التالية فتتركز في البحث عن المعنى الشكلي للجملة ، ويعني ذلك ربط مختلف الكلمات بالاشياء على تنوعها والخصائص والاعمال او العلاقات في العالم من حولنا ، بما في ذلك المجتمع الانساني ونظام معرفته .

لا نجد اي صعوبة من خلال سياق الاتصالات عبر حياتنا اليومية ، في ربط الكلمات المستعملة بالاشياء والخصائص والافعال والعلاقات ، مثلاً لا يمكن لاحد ان يشك في غموض جملة تنطوي على طلب اغلاق النافذة كقولنا : اغلق النافذة الشمالية ، او جملة اخرى تثبت حقيقة معروفة مثل : الملك لويس ميت . ان هاتين الجملتين بسيطتان فعلاً وتتعلقان بمواضيع بسيطة من المحيط ، فجميعنا نعلم ما معنى نافذة واين هي جهة الشمال ، كذلك لا يحتاج الامر معرفة معمقة بالتاريخ بغية الحديث عن موت الملك لويس ، فكل منا قد سمع بحادث موت او شاهده ، أما عن الملك لويس فهناك عدد كبير من الملوك بهذا الاسم . تبقى هنا قضية إجرائية بحثية ، إذ قد لا نسمع الجملة أو ندرك جيداً للوهلة الأولى ، فيطلب السامع ببساطة اعادتها .

ولكن ماذا لو تصورنا الانسان الاول : انسان الكهوف وهو يواجه طلباً كهذا : اغلق النافذة الشمالية ، لا شك سيكون في حيرة من أمره ، تماماً كحالنا الآن ازاء التساؤل الكبير : هل الفيروسات حية او ميتة .

يبدو أن معظم الارتباك والحيرة المتسبب عن محاولة ربط الكلمات بمكونات العالم قد نشأ من محاولات الفلاسفة بدءاً من افلاطون وحتى لوك التي انصبّت على البحث عن المعاني المقابلة لأفكار مثل : نافذة ، قطعة ، أو ميت ، وتركز ذلك البحث على ربط تلك الأفكار بأفكار أخرى أكثر عمومية أو بأمثال تموزجية . يفترض فينا وفق ذلك ، أن نميز النافذة بمشابهتها لفكرة عامة عن النافذة : لنافذة نموذجية في الواقع ، وأن القطعة كذلك بمقارنتها مع قطعة نموذجية تنطوي على كل ميزات « القطعية » . يشير بركلي الى أن الفكرة المجردة عن المثلث أو المثلث



المثال يجب في نفس الوقت الا يكون حاداً او قائماً او متساوي الاضلاع او متساوي الساقين ، انه كل هذه الاشياء وليس أحداً في نفس الوقت .

عندما يعلن الطبيب موت احد الاشخاص فانه انما يفعل ذلك استناداً لبعض المؤشرات الظاهرة التي لا يجدها في الفيروس . واكثر من ذلك ، فعندما يشخص الطبيب مرضاً ما ، لا ينطلق في عمله من مقارنة حالة المريض مع صورة نموذجية للمرض . ان ما يتناوله الطبيب لدى مواجهته المريض هو المظهر العام للمريض ، اضافة لتفاصيل اخرى كدرجة الحرارة والنبض ولون الجلد والتهاب الحلق وغيرها ، كذلك ياخذ الطبيب بعين الاعتبار بعض العلامات التي قد يلفت المريض نظره اليها . ترتبط بعض الاعراض والتظاهرات بمرض معين ، كما تفضي التحاليل المخبرية والدراسات المفصلة الاخرى الى المفاضلة بين الامراض التي تشترك في اعراض متشابهة .

يحدد عالم النبات ، وبشكل مماثل ، صنف معين من النباتات ، سواء اكان معروفاً ام لا وفق قائمة من المواصفات قد يتواجد بعضها بينما يكون البعض الآخر غائباً ، كالحجم واللون ومساحة الاوراق وتوضعها وغير ذلك . تلعب بعض المواصفات دوراً حاسماً في التفريق بين النباتات ، مثلاً خصائص اوراق النباتات ذات الفلقة وخصائص اوراق النباتات ذات الفلقتين ، بينما لا يكون لبعض المواصفات الاخرى ، كحجم الورقة مثلاً ، الا دوراً موجهاً وحسب . يخرج التحليل النهائي بالباحث وقد كون قناعة انه كان على حق ، او على الاقل انه على استعداد للاقتناع انه كان على حق ، وأخيراً يمكن ان يكون النبات وببساطة من صنف جديد .

وهكذا يوضح النشاط اليومي للطب وعلم النبات غياب المرض النموذجي او النبتة المثالية بالمقارنة مع المعايير النفعية الواقعية . وبدلاً من ذلك ، تتوفر قوائم من المواصفات ، لبعضها امكانية التقرير ، وبعضها الآخر صفة التوجيه وحسب .

تمزت أهمية هذه الملاحظة وبشكل قوي من خلال العمل الجاري حالياً لحمل الآلة على تنفيذ مهمات التمييز والتصنيف . لقد أخطأ الباحثون الأوائل باتباعهم آراء بعض الفلاسفة فحاولوا تطبيق فكرة مقارنة الحرف مع حرف نموذج أو المخطط الموجي للصوت ، مع مخطط موجي مثال ، وكانت النتائج مروعة . فقد تم تصميم آلة للمقارنة اسميت اودري كانت مملوءة بالذاكرات ومخازن المعلومات ، واستطاعت تمييز الأرقام المنطوقة بأصوات مختلفة ، إلا أن أخطائها كانت كبيرة جداً . نستنتج بذلك أن الدماغ الانساني لا يعمل وفق طريقة المقارنة مع النماذج إلا في حالات بسيطة محدودة ، ناهيك عن احتمال أن عمله قد لا يكون بهذه الطريقة إطلاقاً .

يقوم الباحثون الأكثر تقدماً في ميدان الإدراك بدراسة المزايا الرئيسية والنقاط البارزة ، وكمثال على ذلك نعتبر الحرف ن فنصفه بكون نصف دائرة دون زوايا أو تغيرات في الانحناء ، تملوها نقطة .

بنى ل . د . هارمون عام ١٩٥٩ في مخبر بيل جهازاً بسيطاً يزن عدة كيلو غرامات كان بإمكانه التمييز بين الأرقام العشرية . ١ ، ٢ ، ٣ ، ٤ ، ٥ ، ٦ ، ٧ ، ٨ ، ٩ إذا كتبت ليس بالرموز وإنما بالكلمات وبخط واضح لم يكن ذلك الجهاز ليقارن الكتابة بنماذج مثالية ، بل كان يصيغ استنتاجاته اعتماداً على ملاحظات محددة : كم مرة ارتفع القلم وهبط عبر خطوط معينة أثناء الكتابة ، هل هناك نقاط ، وخلاف ذلك .

لا يشك أحد إطلاقاً أن الكلمات تشير الى صنوف من الأشياء والأفعال وغيرها . يحيط بنا ويتداخل في حياتنا أصناف كثيرة من الأشياء والأفعال نربط بها عادة كلمات معينة . تتضمن هذه الأصناف أشياء مثل ( ازهار ، دوار القمر ، الفاصولياء ) ، وحيوانات مثل ( القطط ، الكلاب ) وآلات مثل ( السيارات ، الراديو ) ، ومنشآت مثل ( الجراج ، أبنية ) واللبسة مثل ( قمصان ، بيجامات ) وهكذا . كما تتضمن أفعالاً معقدة مثل لبس وخلع الثياب ( يحاول شاردي الدهن ، بما فيهم مؤلف هذا الكتاب ،

اثبات أنهم يستطيعون القيام بهذه الاعمال بشكل لاواعي ) وايضاً شد اربطة الاحذية ( ويتميز هذا الفعل بصعوبة تنفيذه من قبل الاطفال ) ، الى جانب الطعام ، قيادة السيارة ، القراءة ، الكتابة ، جمع الاعداد ، لعب كرة القدم أو كرة اليد ( وهي أفعال تنطوي على مهارات جزئية ) ، وأخيراً الاستماع الى الموسيقى وغيرها وغيرها ....

أميل الى الاعتقاد بأن ما يحدد صنفاً معيناً من الاشياء ليس النموذج أو المثال ، بل قائمة من المميزات ، وهذا ينطبق على الافعال والعلاقات . لا نتوقع أن مثل هذه القوائم ستمكننا من تجزئة خبرائنا في زمر مقلقة منفصلة . بينما نجد مثل تلك الامكانية في لغة العلم سيما عندما نتناول قطاعاً ضيقاً من الخبرة ، إلا أن خبرة الحياة اليومية تتجاوز مثل هذا الوضع ، فتقسم الخبرة فيها أمر مستحيل إلا إذا كانت الأقسام الناتجة غير شاملة وكذلك متداخلة وغير منفصلة . اعتقد على الرغم من ذلك أنه بواسطة قوائم المميزات يمكننا تعريف الأبواب ، النوافذ ، القطط ، القروء ، وأشياء الحياة اليومية الأخرى . كما أميل الى الاعتقاد أن نفس الأسلوب سيمكننا من تحديد الافعال المألوفة كالركض والقفز ، وكذلك الرموز المستخدمة في الكتابة والكلام أي الكلمات .

وهكذا الخص وجهة نظري بالتأكيد على أن مثل هذا التناول قد يحقق آمالنا بجعل الآلة قادرة على تصنيف الاشياء والافعال بدلالة اللغة ، أو تمييز وتفسير اللغة بدلالة فعل ما أو لغة أخرى . واعتقد أكثر من ذلك أن الكلمات التي ليس لها قائمة مييزات محددة ذات جذور واضحة في خبرات الحياة اليومية ، مثل تلك الكلمة يجب أن نقف معها موقف الحذر .

إذا دفعنا طموحنا لفهم اللغة بطريقة تمكننا من جعل الآلة قابلة للتعامل مع اللغة بنجاح كامل ، فعلينا أن نبحث عن قواعد واضحة للغة ، كما أن علينا اكتشاف العلاقات التفصيلية التي تربط الكلمات بالعالم من حولنا ، إلا أن ذلك كله ليس كافياً . إذا أردنا التعامل مع

الجمال على أنها مؤدية لمعان معينة ، فيجب أن نبحث عن تلك المعاني في الواقع ، بكلمة أخرى أن على هذه الجمال أن تترجم بصدق الحياة كما نعيشها .

لا تقدم الحياة أشياء جديدة وأفعال جديدة في كل يوم ، إذ أن الجديد ، في واقع الأمر ، يصنع من الأشياء المعتادة والأفعال المألوفة ولكن في سلاسل أكثر تعقيداً ووفق تراكيب مختلفة وزمر متباينة . نحقق عملية التعلم في بعض الأحيان بإضافة أشياء أو أفعال أو تراكيب من الأشياء والأفعال إلى جعبة خبراتنا ، وهكذا نغني أو نغير حياتنا . وقد ننسى الأشياء والأفعال في أحيان أخرى .

تتوقف أفعالنا الخاصة على الأشياء والأحداث من حولنا . نتفادى سيارة في الطريق ( هنا نميز سلسلة من الأفعال المعقدة ) . عندما نمطس، نتوجه إلى أقرب مصدر مائي ونشرب (؛ مسلسل آخر ولكن متواتر من الأفعال المعقدة ) . وإذا تواجدنا في منطقة مكتظة فلربما قد ندفع الآخرين بالكثف كما فعلنا سابقاً . إلا أن مصادرنا المعلوماتية لا تقتصر على الخبرة المباشرة ، وكذلك فتأثيرنا على الآخرين لا يُحد بالدفع والمزاحمة ، إذا أننا نمتلك أداة قوية لتحقيق أهدافنا : اللغة والكلمات .

نستخدم الكلمات لتعلم العلاقات بين الأشياء والأفعال ولنتذكرها ، وكذلك لإصدار التعليمات للآخرين وتلقي التعليمات منهم ، وأخيراً للتأثير على من حولنا بشكل أو بآخر . تتوقف فعالية الكلمات على التطابق بين أسلوب فهم السامع لها وقصد قائلها ، أي على قبلية السامع لربط الكلمات مع نفس الأشياء والمهارات . أما إذا طلبنا من شخص ما القراءة أو جمع الأعداد ، في الوقت الذي لم يسبق لهذا الشخص أن مارس القراءة أو الجمع ، أي أنه لم يسبق له أن اكتسب هذه المهارات، فإن طلبنا باختصار سيكون عديم الفائدة . وبالمثل سيكون مضيق للوقت والجهد أن نطلب من شخص آخر صيد الروبط بواسطة التيقنوب ، إذا هو لم ير هذين الشيئين سابقاً .

واكثر من ذلك ، فلكي تؤدي الكلمات فائدة لمستخدميها ، يجب ان تشير الى سلسلة واقعية او ممكنة من الافعال . وهكذا سيبدو من غير المفيد ان ننصح شخصاً ما بالسير من لندن الى نيويورك بعد الظهر فور انتهائه من تناول وجبة الساعة السابعة .

وهكذا لا يقتصر اداء اللغة للمعاني على سلامة القواعد وعلى مقابلة الكلمات للاشياء والافعال وغيرها ، بل يعتمد ايضاً على تركيب العالم من حولنا . تضمننا هذه الحقيقة في مواجهة صعوبة بالغة اذا حاولنا ترجمة نص من لغة الى لغة اخرى وتصورنا ان بمقدورنا الحفاظ على جوهر المعنى الوارد في النص المترجم .

ان احد اهم عناصر هذه الصعوبة هو الاختلافات في التصنيفات ، فمثلاً يمكن الناطق بالانكليزية من استخدام كلمة القدم ، او مصطلح الرجل السفلى ، بينما لا يرد في اللغة الروسية الا كلمة واحدة بالمقابل . يملك الهنغاريون عشرين اصبعاً ، او ان الكلمة لديهم هي نفسها لاي شيء ملحق . اذا تحدث اي منا عن الكلاب ، فهو يعني الكلب ذكراً كان ام انثى ، بينما كان الاقدمون اكثر حرصاً على التمييز بين الكلب والكلبة . يقال ان شعوب الاسكيمو تميز بين انواع من الثلج ، واذا رغبتنا بفهم مقاصدهم ، فعلينا تعديل لغاتنا بما يستوعب صفات الانواع المختلفة من الثلج ، الا ان هذه الصفات ستكون ذات اهمية ضئيلة بالنسبة لنا ، لان تصنيف الثلج لم يبرز كقضية هامة في حياتنا . وهكذا فاجزاء العالم المشتركة بين ناطقي اللغات المختلفة والتي تحمل لهم المعاني على السواء ، تقسم الى زمر متباينة وفق الناطقين بكل لغة . تستحيل الكتابة باستخدام لغات مختلفة لكلمات او جمل بسيطة تقابل نفس المجال من الخبرة .

وتبقى بعد ذلك مشكلة اكثر عمقا ، اذ ان الكلمات المأخوذة من لغات مختلفة والمقابلة لنفس الخبرة لا تغطي نفس المساحة من الخبرة . كيف يمكن ان ينقل المترجم الجملة التالية : ربط شريط الحذاء ، الى لغة

قوم يستخدمون احذية بدون شرائط . لن نحل المشكلة بتوصيف معتد من جانب المترجم . وربما يكون هناك معادل ثقافي في اللغة الاخرى . كيف يمكن أن نوفق بين ما قد نصادفه في قصة قديمة تروي عن شخص ما انه بنى بيتاً ، فوق الكاتب عنى ذلك الحفر والنقر في شجرة كبيرة ، او كتلة صخرية صلدة ، بينما يعني بناء البيت في عصرنا استقدام المهندس والبناء والحديد والاسمنت وغيرها .

على انه من المرجح أن تكون الترجمة بين لغتين متقاربتين ناجحة بقدر ما اذا جرت تلك الترجمة على اساس مقابلة الكلمات أو مقاطع الجمل ، وان كانت بعض هذه المحاولات قد ادت الى ترجمة مقطع مثل: ابعاد من النظر ووراء حدود العقل الى المقطع التالي : ابله اعمى . اما اذا كانت الفرق بين الثقافات واللغات كبيرة فان المترجم يفكر اولاً بمعاني الكلمات وفق الاشياء والافعال والانفعالات ثم يحاول اعادة كتابة هذه المعاني باللغة الاخرى . ومن الممكن أن الثقافة المرتبطة باللغة الاخرى هذه لا تنطوي على مكافئات قريبة للاشياء أو الافعال الواردة في النص الاصلي، عندها يجد المترجم نفسه أمام حائط مسدود .

بالضخامة المشاكل التي سيواجهها من يحاول بناء آلة للترجمة . انه لن يستطيع تحقيق مراميه دون تأهيل الآلة بشكل ما للتعامل مع ما اشرنا اليه سابقاً على انه الفهم . لا يقتصر دور الفهم في مجال الترجمة من لغة لاخرى . ان كاتب السيناريو الذي يستطيع وبامانة ترجمة ونقل اساسيات مشهد موت عمة في اومسك الى مشهد موت اب في لوس انجلوس ، سيفشل بشكل متكرر اذا هو حاول اعادة صياغة جملة علمية ، ببساطة لان يعرف الكثير عن الحزن والقليل عن العلم .

نواجه الآن كلمة الفهم ، بعد أن علقنا لفترة وبشكل مؤلم مع كلمة المعنى . يبدو لكلمة الفهم معنيان . اذا فهمنا الجبر أو علم التفاضل والتكامل ، فنستطيع استخدام تقنيتهما في حل مسائل لم نواجهها سابقاً وبرهان نظريات لم يسبق أن برهنت . يتجلى الفهم هنا بقوة

الفعل والخلق وليس مجرد التكرار . يمكن أن نقول في هذا المعرض أن الكمبيوتر يستطيع الفهم إلى حد ما ، إذ أن باستطاعته برهان بعض النظريات في المنطق الرياضي إذا تمت برمجته لهذه الغاية . إلا أن هناك جانباً انفعالياً للفهم إذا استطعنا برهان نظرية ما بطرق متعددة وضمناها إلى غيرها من الحقائق والنظريات بهدف التنسيق ، كذلك إذا تناولنا موضوعاً ما من مناظير مختلفة بغية اكتشاف علاقة طرق التناول المختلفة هذه مع بعضها ، قلنا في كل الأحوال أننا نتفهم القضية بعمق ، وغمرنا شعور عميق وحار بإمكان تعاملنا معها . لربما شعر بعضنا بهذه الحرارة في أحيان متفرقة دون أن تتظاهر القابلية لديهم ، إذ اتضح لدى الاختبار زيف دافئ المشاعر التي غمرتهم للحظات .

قادنا تناول اللغة من منظور نظرية المعلومات إلى معارج مختلفة من أمواج الكلمات حيث واجهنا أحكام القواعد غير الكاملة واقتحمنا مجاهل المعنى والفهم . يظهر كل ذلك المدى الواسع الذي قد يندفع المرء فيه بسبب الجهل . سنظهر بمظهر مضحك فعلاً ، إذا حاولنا التأكيد على أن نظرية المعلومات أو أي شيء آخر قد مكنتنا من حل مشاكل اللغويات ، المعنى ، الفهم ، وفلسفة الحياة . وما يمكننا قوله في أحسن الأحوال أننا نندفع قليلاً أبعد من القيود الميكانيكية للغة في محاولة كشف الخيارات التي تسمح بها اللغة . أن ذلك يلفت الانتباه إلى مسائل تتعلق باستخدام ووظيفة اللغة ، إلا أنه لا يبرهنها . وأخيراً فربما يفضل القارئ مشاركتي جهلي المقدم مجاناً فيما يتعلق بهذه الأمور أو لعله يود الاستمتاع بجهله الخاص .

★ ★ ★ .





## الفصل السابع

### الترميز الفعال

لن نستطيع ممارسة فهم الطبيعة مرة أخرى كما فهمها قدماء اليونان . إذ أن التفسير العام للظواهر المألوفة من خلال عدد قليل من المبادئ الشاملة لم يعد مرضياً البتة . أننا نعلم اليوم الكثير ويجب أن نفسر الكثير مما فات قدماء اليونان . كما يجب أن نحرس على ملائمة نظرياتنا للمجال الواسع من الظواهر التي حلولوا تفسيرها . نؤكد أنهم زودونا بدليل عمل مفيد وليس بأسلوب عقلنة العالم . تتجلى عظمة ميكانيك نيوتن في أنها مكنت من التنبؤ بمواقع الكواكب والأقمار الصناعية وكذلك من فهم مجموعة من ظواهر الطبيعة الأخرى . نحن أكيدون أن ميكانيك نيوتن لم يكن السبب في تحريك ودعم الفهم الميكانيكي للحياة والكون .

يشعر الفيزيائيون المعاصرون أنهم راضون تملأ عن اعتقادهم المتضمن إمكان تفسير كل خواص المادة ( عدا النووية منها ) بواسطة قوانين الميكانيك الكوانتي ، بما فيها الخواص الفيزيائية ، الكيميائية ، والحيوية ، وذلك باستخدام فرض بسيط ينص على وجود الإلكترونات وعدة أنواع من نوى الذرات . إلا أن ما يحير ويربك فعلاً أن الجملة الفيزيائية الوحيدة التي حسب خواصها ودرست بشكل كامل هي ذرة الهيدروجين المنزلة .

يستطيع الفيزيائيون تفسير ظواهر فيزيائية أخرى بدقة بالغة والتنبؤ بها ، كما يستطيعون تناول ظواهر فيزيائية مختلفة بطرق نصف حسابية . إلا أن تناول النظري الدقيق دون العودة الى المعلومات التجريبية ما زال قاصراً بالنسبة لمجموعة من الظواهر الحرارية ، الميكانيكية ، الكهربائية ، والكيميائية وعماد هذا التناول النظري هو كما ذكرنا الميكانيك الكوانتي المطبق بشكل رئيسي على النوى والالكترونات . إن تتبع العمليات البيولوجية المعقدة حتى أصولها في المبادئ الكوانتية يبدو أمراً بالغ الصعوبة لدرجة يبدو معها الميكانيك الكوانتي قليل الأهمية بالنسبة للبيولوجيا . ويبدو الأمر كما لو أننا وضعنا اليد على فرضيات قطاع هام من الرياضيات ولم نستطع إلا برهان بعض النظريات البسيطة .

وهكذا يحيط بنا في العالم جملة معقدة من الظواهر والمشاكل تتجاوز آمالنا بإمكان إحاطتها بنظرية شاملة واحدة مهما كانت تلك النظرية صحيحة من حيث المبدأ . لقد ظلت مشاكل العلم التي نربطها عادة بالفيزياء هي الأكثر إثارة وتحريكاً حتى وقتنا هذا بالمقارنة مع جوانب الطبيعة الأخرى التي ما زالت تحيرنا ، وإن كان قد دخل مؤخراً حلبة الاهتمام علما جديداً : الكيمياء الحيوية وعلم وظائف الأعضاء .

اعتقد ، على كل حال ، أن المشاكل التي يطرحها التطور التكنولوجي المعاصر لا تقل تحدياً عن تلك التي نواجهها في الطبيعة . ما الذي يمكن أن يكون أكثر إثارة من محاولتنا كشف إمكانات الكمبيوتر في برهان النظريات أو في مماثلة أنماط من السلوك تعودنا على وصفها بالإنسانية . لا تقل تحدياً مشاكل الاتصالات الكهربائية . لقد أوت القياسات الدقيقة بوسائل كهربائية إلى إحداث ثورة في فيزياء الصوتيات . كما افتتحت الدراسة المرتبطة بالاتصالات الهاتفية عهداً جديداً في دراسة السمع والمخاطبة إذ تبين أن الأفكار السابقة المتعلقة باللغويات غير كافية . هذا هو حقل دراسات نظرية الاتصالات حيث تتلاطم عشوائيا الجوانب الكثيرة للجهل الجديد والقلّة الشحيحة المتوفرة من المعلومات .

إذا كان على نظرية الاتصالات أن تؤخذ على محمل الجد ، كما هي الحال مع قوانين نيوتن ، فعلى هذه النظرية أن تقدم لنا دليلاً جيداً فيما يتعلق بمشاكل نظرية الاتصالات ، ويجب أن تبرهن كذلك أن فيها مادة حقيقية ومستمرة تتجسد في بلوغ مستويات عالية من الفهم والقوة . وكما هو متوقع فإن البحث عن هذه المادة إنما يجب أن يتم في مجال الإرسال الدقيق والفعال للمعلومات . إن هذه المادة موجودة فعلاً ، وكما رأينا فقد وجدت فعلاً وبشكل غير مفهوم بالكامل حتى قبل أن يوحدنا عمل شانون ويجعلها سهلة الإدراك .

نحتاج فهماً أساسياً وجديداً لمتابعة موضوع الإرسال الدقيق للمعلومات ، وهذا سيكون موضوع الفصل النادم . إلا أن الفصول السابقة قد وضعنا في موقع يمكننا من شرح بعض جوانب الإرسال الفعال للمعلومات .

وجدنا أن انتروبي مصدر المعلومات مقدرة بالبيت لكل رمز أو لكل نائية تعطينا قياساً لعدد الأرقام الثنائية ، لعدد نبضات القطع والوصل لكل رمز أو لكل نائية ، الضرورية لبث رسالة . نحتاج بعد معرفة عدد الأرقام الثنائية الضرورية للترميز والإرسال ، لاكتشاف طريقة عملية للترميز لا تستخدم من الأرقام الثنائية وفي أسوأ الأحوال إلا ما يزيد قليلاً عن هذا العدد الأصغري .

تقضي المستجدات في الرياضيات ، العلم ، أو الهندسة ، وعلى الدوام بالبحث عن طرائق ميكانيكية شاملة لحل المسائل . تنبع أهمية هذه الطرائق من أنها تبرهن على إمكانية حل المشاكل ، إلا أنها لا تبدو عملية في حالة القضايا المعقدة ، كما أنها تكون غير مجدية إطلاقاً في بعض الأحيان . ونضرب مثلاً على ذلك توفر الحل الرياضي الدقيق لمعادلة الدرجة الثالثة ، إلا أن أحداً ما لا يستخدمه في حالة المسائل العملية : يستخدم عوضاً عنه طريقة تقريبية مناسبة للمسألة المطروحة .





إذا تقدمنا بألية ميكانيكية في عملية ترميزنا للنصوص الانكليزية بشكل اكثر كفاءة ، لقمنا بترميز ازواج الاحرف ثم تراكيبها الثلاثية ، وهكذا . إلا أن هذه الطريقة ستفضي الى ترميز عدد كبير من النصوص ، هي في واقع الامر ليست نصوصاً لغوية مقبولة ، وهذا يدفعنا الى اعتبار التركيب الاعلى للغة : الكلمة . وقد بينا في الفصل الرابع أن مثل هذا الاعتبار يخفض عدد الأرقام الثنائية اللازمة لترميز كل حرف الى ١٧ اي الى حوالي ٩ ارقام ثنائية لكل كلمة .

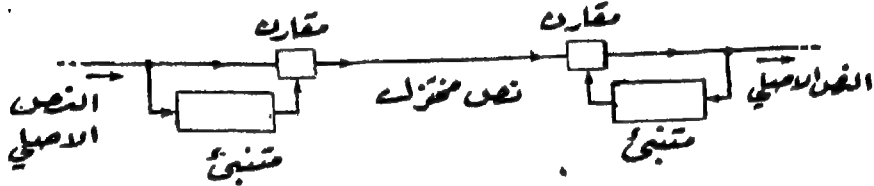
||  
أما إذا رغبتنا بمزيد من التقدم ، فعلىنا دراسة العبارات والجمل ، وهذا يصل بنا الى القواعد . ان المشكلة هنا هي حقيقة كوننا لا نملك جملة متكاملة من احكام القواعد ، وأنه حتى لو امتلكننا مثل هذه الجملة فإن نظام الاتصال الذي سيستخدمها لا شك سيكون معقداً بدرجة كبيرة . لا زال من المرغوب في الحالات العملية ترميز الاحرف الانكليزية بشكل مستقل مما يستلزم استخدام ٥ ارقام ثنائية لكل حرف .

لعل من الاهمية بمكان ان نأخذ فكرة عما يمكن أن ننجزه عبر ارسال النصوص اللغوية . افترض شانون ، لتحقيق هذه الغاية ، وضعية الاتصالات التالية . نفرض أننا طلبنا من شخص ما أن يحزر مستخدماً كل معرفته باللغة الانكليزية ، ماذا سيكون الحرف التالي في نص معين . إذا كان الحزر صحيحاً ، أخبرنا صاحبه بذلك ، وطلبنا منه كتابة الحرف ، أما إذا كان خاطئاً ، فإما أن نخبره بالحرف الصحيح أو نطلب منه تكرار الحزر حتى يصل الى الحل الصحيح .

نفرض الآن ان هذه العملية تجري عند المصدر ، وأن توأماً للشخص المعني يقبع عند المستقبل ، وأن هذا التوأم يطابق الشخص عند المصدر في كل شيء ، بما في ذلك الحزر الصحيح والخاطئ . وهكذا فلإرسال النص نطلب من الشخص عند المصدر أن يحزر ، وإذا كان حزره

صحيحاً ، كان حزر التوأم عند المستقبل صحيحاً ايضاً . وهكذا نحتاج لإرسال المعلومات الى التوأم عند المستقبل فقط في حالة الحزر الخاطئ للشخص عند المصدر وعندها يجب ارسال ما يكفي من المعلومات كي يتمكن الأشخاص عند المصدر وعند المستقبل من كتابة الحرف الصحيح .

رسم شانون مخططاً لنظام الاتصالات هذا موضحاً في الشكل ٧ - ١



الشكل ٧ - ١

يعمل المتنبئ على النص الأصلي ، ثم يقارن الحزر مع الحرف الصحيح ، فلذا لوحظ خطأ ما ، أرسلت بعض المعلومات . يجري التنبؤ عن الحرف التالي عند المستقبل بالاستناد الى النص المعاد إنشاؤه . تجري بعد ذلك مقارنة للإشارة المستقبلية ، فلذا لم يكتشف أي خطأ ، يتم استخدام الحزر ، وإلاّ يستخدم النص المختزل لإصلاح الخطأ .

لا نملك في واقع الأمر مثل هذا التوأم أو أي متنبئ فعال مماثل . وعلى الرغم من ذلك فقد تم استخدام نظام لإرسال الصور يستند أساساً على الشكل ٧ - ١ وهو في واقع الأمر ذو طابع ميكانيكي صرف وبسط من الشكل المذكور . لقد كان هدف شانون مختلفاً على كل حال، فقد اكتشف سرعة الإرسال المطلوبة في هذا النظام وذلك باستخدامه شخص واحد فقط واستغناؤه عن التوأم ودراسة الأخطاء التي يرتكبها هذا الشخص عند المصدر . لقد لخص النتائج الشكل ٥ - ٤ من الفصل

الخلاص . يمكن تحسين التنبؤ بالاعتماد على ١٠٠٠ حرف سابق عوضاً عن ١٠ أو ١٥ حرف . ويحتاج اصلاح الاخطاء في التنبؤات بين ٠.٦ الى ١.٣ رقم ثنائي لكل رمز . نستنتج أنه بقدر صحة هذه النتيجة فإن انثروبي النصوص الانكليزية تقع بين ٠.٦ - ١.٣ بيت لكل حرف .

يوفر المصدر المتقطع نموذجاً جيداً للبحث والمناقشة ، إلا أنه لا أهمية على الصعيد العملي . أما السبب في ذلك فهو أن المعايير الحديثة للاتصالات الكهربائية تنص على استخدام عدد قليل من الأرقام الثنائية أو نبضات القطع والواصل لإرسال النصوص الانكليزية . يجب أن نستعمل أنفسنا كي نستطيع النطق بحوالي مائة كلمة في الدقيقة ، إلا أنه أمر في منتهى السهولة أن نرسل ١٠٠٠ كلمة عبر سلك الهاتف في كل دقيقة أو ١٠ ملايين كلمة عبر قناة تلفزيونية في كل دقيقة ، ويمكن من حيث المبدأ وليس من الناحية العملية إرسال أكثر من ٥٠٠٠٠٠ كلمة في الدقيقة عبر القناة الهاتفية وحوالي ٥٠ مليون كلمة في الدقيقة عبر القناة التلفزيونية . لقد تخطينا في واقع الأمر عن ترميز مودس الذي يرسل بعوجه الحرف  $\mathbb{Z}$  بسرعة أكبر من الحرف Z . تستخدم الأنظمة الحديثة نفس طول الإشارة لكل حرف .

تبرز أهمية الترميز الفعال والكفؤ في حالة إرسال الأصوات بأكثر مما تبرز في حالة إرسال النصوص ، ذلك لأن الصوت يحتاج كمية أكبر من الأرقام الثنائية لكل كلمة بالمقارنة مع النص المكتوب ، وأكثر من ذلك فالترميز الفعال أعظم أهمية في حالة التلفزيون منه في حالة الصوت .

إن الإشارة التلفزيونية أو الصوتية هي إشارة مستمرة ، إذا ما قورنت بالنصوص اللغوية ، الأعداد ، أو الأرقام الثنائية التي هي اشارات متقطعة . وإذا استثنينا استخدام الأحرف الكبيرة والفواصل والاشارات الخاصة، تحتوي النصوص الانكليزية على الأحرف والفراغات وحسب . تتميز الموجة الصوتية أو الصوت الإنساني وفي كل لحظة بضغط معين ضمن مجال معين من الضغوط . سبق ورأينا في الفصل



الرابع انه اذا كانت تواترات الإشارة المستمرة محدودة ضمن مجال عرضه س ، فيمكن تمثيل الإشارة بعينات أو قياسات للسعات عددها ٢ س في كل ثانية .

نتذكر على كل حال ان الانتروبي لكل رمز تتوقف على عدد القيم التي يمكن لهذا الرمز أن يأخذها ، وبما ان الإشارة المستمرة يمكنها ان تتخذ عددا لا نهاية له من القيم عند قياس عينة ما ، فإننا نندفع الى الاستنتاج بأن انتروبي الإشارة المستمرة ستبلغ قيمة لانهاية من وحدات البيت في الثانية ولكل عينة .

تتوقف صحة هذا الاستنتاج على رغبتنا باستعادة الإشارة المستمرة مطابقة لشكلها الاصيل بصورة دقيقة . يهدف ارسال الإشارة الى عرضها أو إسماعها ، لذا فلا تتطلب استعادتها إلا درجة معينة من التقريب ، وهكذا فقد حدد شانون ويهدف التعامل مع الإشارات المستمرة معيارا للامانة . ان تحقيق هذا المعيار لدى استرجاع الإشارة المستمرة لا يستلزم الا عددا محددا من الارقام الثنائية لكل عينة أو لكل ثانية . ثبت اذن ان انتروبي المصدر المستمر لها قيمة محددة من وحدات البيت لكل عينة أو لكل ثانية ، اذا اخذنا بعين الاعتبار التقريب المقبول والمعين الذي يفرضه معيار الامانة .

يجب ان يرتبط معيار الامانة بالامتدادات الطويلة للإشارة وليس بالعينات فقط . وهكذا اذا ضخمنا كل عينة بمقدار ١٠٪ لدى ارسالنا الصوت فان ما سنحصل عليه هو مجرد صوت أعلى دون المساس بنوعية وجودة الصوت . اذا ارتكبنا خطأ عشوائي مقداره ١٠٪ في كل عينة فستتلىء الإشارة المسترجعة بالضجيج . وبشكل مماثل ، اذا اعتبرنا بث الصور وحدث خطأ متدرج عبر الصورة سواء باللحان أو التباين فان هذا الخطأ سيمضي دون ملاحظة ، أما اذا لم يكن الخطأ متدرجا بل تغير من نقطة لآخرى ، فسيكون من المستحيل احتماله .

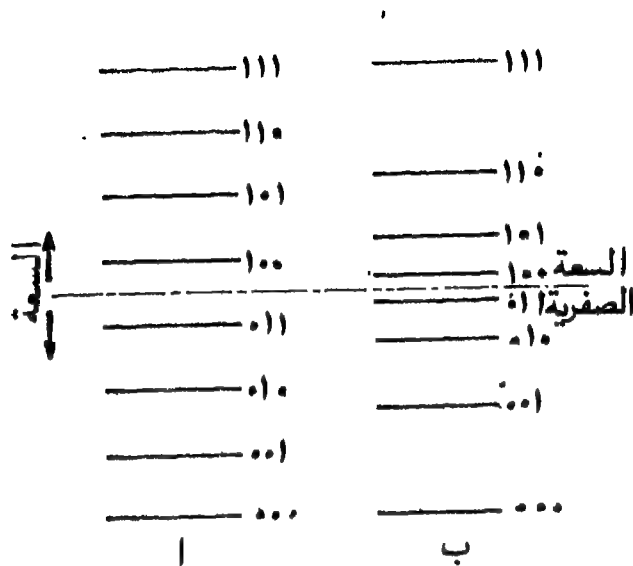
رأينا أنه من الممكن إرسال إشارة مستمرة بجعل عيناتها تتخذ قيمة محددة فقط ، ويبدو أن ١٢٨ قيمة تكفي لإرسال الحوار الهاتفي أو الصور يجب أن نلاحظ ، أن عملية تحديد العينات في إشارات التخاطب أو الصور تعتبر في عداد العمليات الغاية في البساطة كما هي الحال في حالة ترميز الرسائل حرفا بحرف عوضا عن ترميزها كلمة بكلمة .

يمكن أن تتجاوز عملية أخذ النماذج من الإشارات المستمرة إلى اعتبار أكثر من عينة في وقت واحد . ولعل هذا هو الطريق السليم للترميز الفعال والكفوء للإشارات المستمرة ، إلا أن تنفيذ مثل هذا العمل هو أمر صعب فعلا ، إذ أن العينات يتنم حصرها بشكل مستقل سواء في نظم تعديل رموز النبضات التي تنقل المخابرات الهاتفية من مقسم هاتفي إلى مقسم آخر ومن بلدة أخرى أو في المقاسم الرقمية التي تؤمن المخابرات الأبعد . كذلك تحصر العينات بشكل مستقل عند استقبال الصور الواردة من المريخ والمشتري والكواكب الأبعد .

تعتبر عدة سويات أو ساعات في حالة نظم تعديل رموز النبضات ، وتربط أقرب سوية أو ساعة بكل عينة ، وإذا استخدمنا كمثال ثمانية سويات فنجد خيارنا لها بحيث تتبادل عن بعضها بمسافات متساوية كما يوضح الشكل ٧ - ٢ . يرسل المنسوب المثل للعينة ببث الرقم الثنائي المثبت على يمين المنسوب .

ستطيع أن نذهب بالترميز أبعد من ذلك فنضيق المسافات بين المناسب ، فبدلا من المسافات المتساوية بينها كما في الشكل ٧ - ٢ - ١ نستطيع تضيق المسافات بين المناسب للإشارات الصغيرة وزيادتها للإشارات الكبيرة كما يوضح الشكل ٧ - ٢ - ب .

أن سبب هذا ، هو بالطبع ، أن آذاننا حساسة لأي تغير طفيف في الضغط فوق أو تحت المعدل أكثر بكثير من حساسيتها للتغيرات الكبيرة جدا بالنسبة لهذا المعدل وما يقابلها من تغيرات مقابلة موجبة أو سالبة



الشكل ٧ - ٢

في كمون الإشارة . يؤدي ضغط السعات العالية عند المصدر وتحديدًا مرة أخرى عند المستقبل إلى تخفيض عدد الأرقام الثنائية اللازمة لكل عينة مع الحفاظ على جودة الإرسال وذلك بالمقارنة مع الحالة التي نحافظ فيها على فروقات ثابتة بين السعات ، ويسجل هذا الانخفاض في أرقام ثنائية : من ١١ إلى ٧ .

يترتب علينا تحقيق دراسة شاملة للصوت والسمع إذا رغبتنا بإرسال أكثر فعالية للتخاطب ، وجل ما يلزمنا الاقناع السامع بجودة الإرسال هو تحقيق دقة معقولة في البث .

ليست الفعالية هي كل شيء . لا يستطيع رمز الأصوات إرسال أكثر من صوت واحد في وقت واحد ، كما أن هذه الرموزات تتصرف بشكل

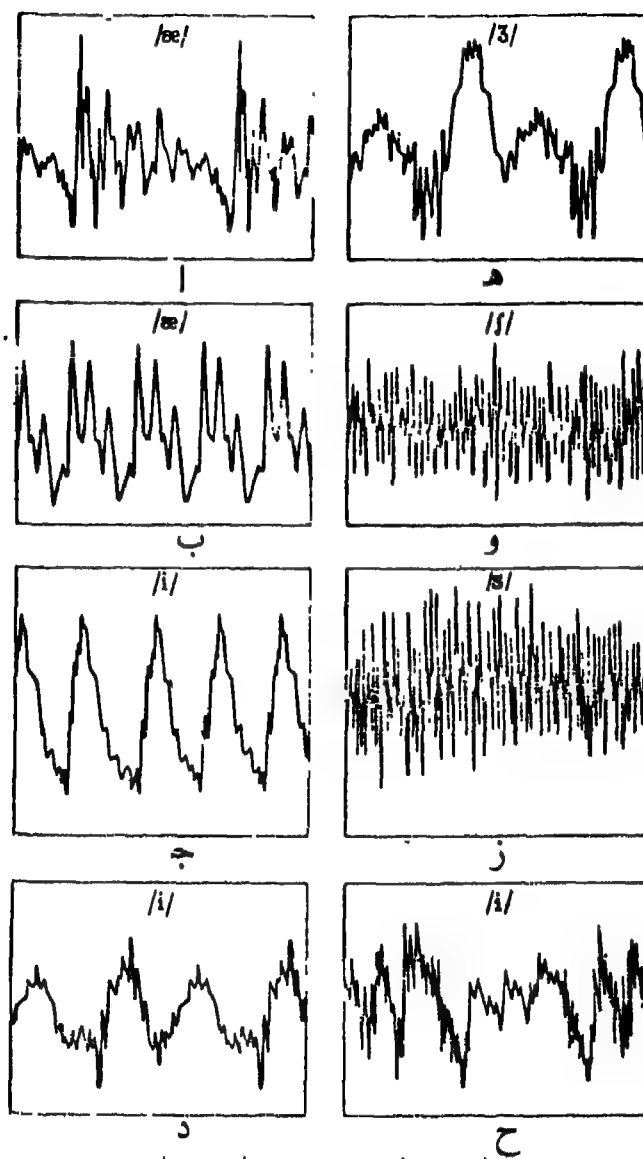
سيء اذا تكلم المرسل في جو من الضجيج . نتمكن من تجاوز هذه الصعوبات بتحقيق ارسال اكثر فعالية لوجة الصوت ، وهو ما يسمى بتحليل الموجة ، الا ان عددا من الارقام الثنائية مساو لـ ١٥٠٠٠ - ٢٠٠٠٠ رقم في كل ثانية يبقى ضروريا للتخاطب المقبول .

يوضح الشكل ٧ - ٣ اشكال مختلفة لامواج التخاطب الصوتية ، اي تغير ضغط موجة الصوت مع الزمن ، وما يقابله من تغير في الكمون الكهربائي الممثل له . نلاحظ ان بعض الاشكال الموجية تكرر نفسها بدقة ، سيما في حالة الاحرف الصوتية الانكليزية (ا) بدءا من الشكل ٧ - ٣ - ١ حتى ٧ - ٣ - ٤ . او ليس من الممكن في هذه الحالة ارسال الشكل النموذجي للموجة واستخدامها من ثم خلال ادوار متكررة لاحقة . الواقع ان هذا من الصعوبة بمكان ، اذ ان الآلة لن تستطيع تحديد الدور الواقعي للحرف من خلال الكلام المنطوق ، فلقد تم تجريب هذا الامر وكان الكلام الناتج مفهوما الا انه كان مشوها بدرجة كبيرة .

ينبغي استخدام طرق اكثر عمومية اذا اردنا ترميز الكلام المنطوق بشكل فعال . يجب ان نعلم اولا عدد الاصوات المختلفة التي يجب ارسالها وما مدى تحسس اسماعنا ازاء مشكلة تمييز هذه الاصوات عن بعضها .

يتغير ضغط الهواء الممثل للاصوات بشكل سريع ، وتصل سرعة هذا التغير الى مرتبة عدة آلاف في الثانية ، بينما تمارس ارادتنا التحكم في حبالنا الصوتية ببطء بالغ ، وفي احسن الاحوال نغير نمط الانتاج الاصوات عدة عشرات من المرات في كل ثانية . لهذا فالصوت يمكن ان يظهر لنا ، وهو في الواقع كذلك ، ابطأ بالمقارنة مما قد نستخلصه من دراسة التغيرات السريعة في ضغط الامواج الصوتية .

ما هو نوع التحكم الذي نمارسه على اعضاء التصوير فنيا . نتحكم اولا باصدار اصوات مسموعة بواسطة تأثيرها في حبالنا الصوتية . هذه الحبال هي عبارة عن شفتين او ثنيتين من نسيج عضلي مرتبط الى علة



الشكل ٧ - ٣

غضروفية تعرف باسم الحنجرة ، وهي ناتئة لدى الرجال وتعرف باسم تفاحة آدم . تكون الحبال الصوتية مفتوحة في حالة الصمت ، ويمكن تقريبها من بعضها بحيث أن الهواء المندفع من الرئتين يمروره بينهما سيتسبب باصدار اصوات معينة . يكون الصوت الصادر ذي تواتر عال جدا اذا كانت الحبال الصوتية جد قريبة من بعضها ، بينما ينخفض ذلك التواتر اذا ابتعدت الحبال عن بعضها .

تمتلك دقات الهواء المارة عبر الحبال الصوتية تواترات كثيرة . يلعب الغم والشفتان دور مرنان معقد يبرز بعض التواترات أكثر من غيرها . وتتوقف هذه العملية على وضع اللسان داخل الغم ، وعلى مدى انفتاح الفتحين الانفيين على الغم والرغامى وكذلك على مقدار انفتاح الغم ووضع الشفتين .

يتم النطق بالاحرف الصوتية وغيرها من الاحرف وكذلك تنوع اشكال التصويت عن طريق حث الحبال الصوتية واعطاء هيئات مختلفة للجوف الفموي .

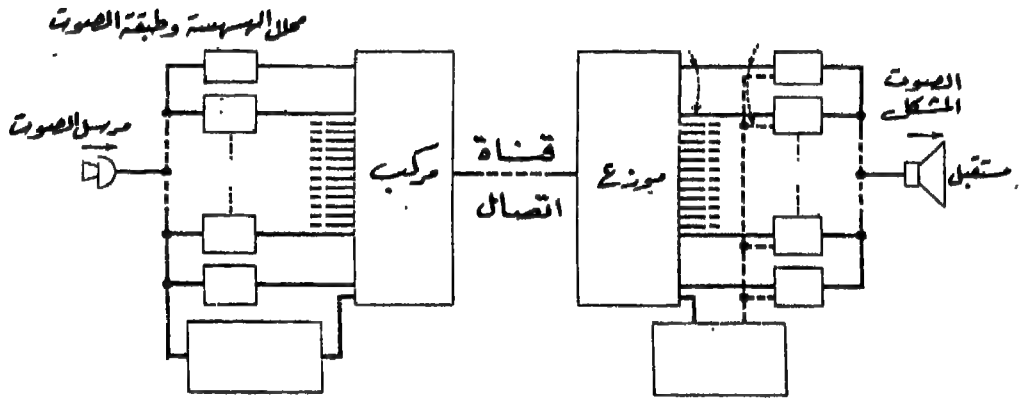
تم صياغة الاصوات الخاصة ببعض احرف اللغة الانكليزية مثل : p , b , g , t بايقاف المجرى الصوتي عند عدة نقاط بواسطة اللسان أو الشفتين ، مما يخلق ضغطا هوائيا ، لا يلبث أن يطلق فجأة . تستخدم الحبال الصوتية في انتاج بعض الاصوات ، كالصوت الخاص بالحرف الانكليزي B ولا تستخدم في انتاج اصوات اخرى كالصوت الخاص بالحرف P ..

وماذا عن بعض الاحرف والتراكيب الاخرى مثل S , SH . . الواقع ان اصدار الاصوات الخاصة بها يتم عبر انقباضات مختلفة ، وتستهمل الحبال الصوتية في بعض الاحيان ، كما في الصوت الخاص بالتركيب ZH .

ان سرعة التغير للاعضاء الصوتية هي اقل بكثير من الاصوات المنتجة الا يمكن أن نستخدم هذه الحقيقة في الترميز الفعال للتخاطب .

أخترع هومر دادلي من مختبرات بيل في الثلاثينات من هذا القرن وقبل أبحاث شانون في نظرية المعلومات ، طريقة من هذا الطراز لارسال المعلومات دعاءها بمرمز الاصوات . يوضح الشكل ٧ - ٤ وحدة الارسال ( المحلل ) ووحدة الاستقبال ( المركب ) من رموز اصوات .

٤٧٠



الشكل ٧ - ٤

يغذي في المحلل بديل كهربائي للصوت الى ١٦ مرشحاً ، يحدد كل منها شدة الإشارة الصوتية في خزام معين من التواترات ومن ثم يبت الاشارة الى المركب الذي يعطي هذه المعلومات . يجري كذلك تحليل آخر لمعرفة الأحرف غير الصوتية من الأحرف الصوتية ، وفي حالة وجود الأحرف الصوتية يتم اكتشاف طبقتها .

إذا كانت الأحرف الصوتية غائبة ظهر هسيس عند المركب ، وإذا كانت موجودة صدفّت سلسلة من النبضات الكهربائية بسرعة تناسب نفثات الهواء عبر الجبال الصوتية للناطق .

يمرر الهسيس أو النبضات عبر مجموعة من المرشحات ، حيث يمرر كل مرشح حزمة من التواترات مقابلة لمرشح معين في المحلل . يتم التحكم

بكمية الصوت المارة عبر مرشح معين من المركب بواسطة خرج المرشح المقابل في المحلل بحيث تكون هذه الكمية مساوية لما يشير لوجوده مرشح المحلل في الصوت وضمن ذلك المجال من التواترات .

تنتج هذه العملية الأصوات المفهومة . فما يتم هو ان المحلل يستمع الى الأصوات ويحللها ، ثم يصدر التعليمات للمركب ، والذي هو آلة ناطقة صناعية ، كي يقول كل الكلمات مرة أخرى بنفس اللهجة والطبقة الصوتية للناطق .

ان لمعظم رموزات الأصوات لهجة كهربائية قوية وغير مستحبة . لقد قادت هذه المشكلة الى افكار جديدة حول العوامل المؤثرة على طبيعة الصوت ، الا اننا لن نتابع هذا الموضوع هنا . وتبقى رموزات الصوت ، رغم ذلك مفيدة ، حتى الرموزات غير الكاملة منها . ويكون من الضروري أحياناً تفسير إرسال الأصوات . اذا اختزلنا الحديث الى ارقام ثنائية بتعديل ترميز النبضات ، يجب عندها إرسال من ٣٠٠٠٠ الى ٦٠٠٠٠ رقم ثنائي في كل ثانية ، ينخفض هذا الرقم الى ٢٤٠٠ باستخدام رمز الأصوات .

لا يمثل رمز الأصوات في الشكل ٧ - ٤ الا نموذجاً من اصناف عديدة من الاجهزة ، نطلق عليها جميعاً اسم رموزات الأصوات ، وتشارك بميزة تحليل الأصوات وإرسال اشارات تحت آلات ناطقة . يجد التحليل في الترميز الخطي المتنبئ عوامل بطيئة التغير يمكنها التنبؤ بالعينة القادمة من الحديث على أساس مجموع عينات سابقة مأخوذة بأوزان مختلفة وفق أهميتها . يمكن بث إشارة خطأ أيضاً بهدف تصحيح خرج الآلة الناطقة . يعطي الترميز الخطي المتنبئ حديثاً جيداً اذا أرسل ٩٦٠٠ رقم ثنائي في كل ثانية ، وحديثاً مفهوماً اذا أرسل ٢٤٠٠ رقم ثنائي في كل ثانية ، وأخيراً حديثاً واضحاً للغاية اذا هبط هذا الرقم الى ٦٠٠ رقم ثنائي في كل ثانية .

يمكن استنتاج عوامل أخرى للحديث من عوامل التنبؤ الخطي . يمكن استنتاج اشارات القناة المميزة لرمز أصوات القناة في الشكل ٧ - ٤



من عوامل التنبؤ الخطي . كذلك يمكن استنتاج تواترات الطنين لجهاز التصويت المميزة لأصوات مختلفة . لقد اقترح استخراج العوامل المؤثرة على جهاز التصويت وأرسالها . إذا استطعنا استخدام هذه العوامل لتمييز الأصوات المختلفة للحديث ، وأرسلنا دلائلها وحسب ، لحصلنا على ما يسمى مرمز أنواع الأصوات والذي يستطيع إرسال الحديث بنفس كفاءة وفعالية النص .

سنستعرض مرمز الأصوات بشكل سريع قبل اغلاق موضوعه .

لنلاحظ أن إرسال الأحاديث باستخدام أكثر رموزات الأصوات اقتصادية يستلزم كمية من الأرقام الثنائية لكل كلمة أكثر مما يلزم لإرسال النصوص المكتوبة . ويتعلق ذلك ، بشكل جزئي ، بالصعوبات التقنية في تحليل وترميز الأحاديث بالمقارنة مع النصوص المطبوعة ، إضافة إلى أننا في حالة إرسال الأحاديث ، نبث المعلومات كما هي الحال في حالة النصوص ، إضافة لخصوصيات الأحاديث كنوعية الأصوات وطبقتها واللهجة وغيرها . بكلمة مختصرة إن انتروبي الأحاديث أكبر من انتروبي النص محسوبة لكل كلمة .

يتميز مرمز الأصوات عن غيره بقابليته ترميز الأحاديث بفعالية وكفاءة ، وسبب ذلك أن مكونات أجهزة التصويت تتغير ببطء بالمقارنة مع تقلبات الأمواج الصوتية التي تنتجها تلك الأجهزة . تعتمد فعالية رموزات الأصوات أيضاً على حدود حاسة السمع لدى الإنسان .

أن أكثر أنواع الأصوات تعقيداً هو الهيسيس كما في حالة نطق SH ( الشكل ٧ - ٣ - و ) ونطق SH ( الشكل ٧ - ٣ - ز ) ، كما أن نطق حرف S بشكل متكرر يرتب شكلاً موجياً مختلفاً تماماً . ويقتضي الأمر عدداً كبيراً من الأرقام الثنائية في كل ثانية لإرسال المنطوق في كل مرة ، أما بالنسبة للأذن الانسانية ، فيبدو النطق الأول لحرف S مماثلاً للنطق الثاني إذا كان له نفس محتوى التواترات بشكل عام . وهكذا لا يتوجب على مرمز الأصوات استعادة صوت الحرف S

الذي نطقه المتكلم ، بل نكتفي منه بتكرار الصوت S الذي له نفس محتوى التواترات تقريباً ، وبالتالي يكون له وقعاً متشابهاً .

يتضح اذن أن الترميز، الفعال في ارسال الاحاديث يعتمد على تحديد نماذج بسيطة وهامة واعادة تشكيلها عند المستقبل . تبرز اهمية الترميز الفعال بشكل اكبر في التلفزيون بالمقارنة مع ارسال الاحاديث ، لان القضية تتعلق هنا بقناة ارسال ذات سعة اكبر . هل يمكن تطبيق نفس المبادئ في حالة التلفزيون .

واقع الامر إن مشكلة التلفزيون أعقد بكثير من ارسال الاحاديث المنطوقة ، وسبب ذلك بشكل جزئي أن حس البصر أكثر تفصيلاً وتمييزاً من حس السمع ، ولأن التلفزيون يرسل صوراً شديدة التنوع ومن مصادر مختلفة ، بينما تتولد الاحاديث من نوع واحد من أجهزة التصويت .

وهكذا ، فلاستخدام طريقة شبيهة بمرمز الأصوات في حالة التلفزيون علينا أن نقصر ارسالنا التلفزيوني على نوع واحد من مصادر الصور ، كالوجوه الانسانية على سبيل المثال .

لنتخيل نموذجاً مطاطياً للوجه الانساني عند المستقبل . يمكننا حفظ مواصفات هذا الوجه في ذاكرة كومبيوتر ضخم . ينظر المرسل أولاً إلى الوجه الذي سيرسل ، ثم يقوم بتشكيل النموذج عند المستقبل بالشكل والهيئة . كما أن على المرسل أن يلاحظ مصادر الضوء ويكررها ذاتها بالشدة والاتجاه عند المستقبل . يتابع المصدر حركات العينين للشخص الذي يتكلم بالقرب منه ، وكذلك حركات الشفتين والفكين وخلجات العضلات الأخرى لكي يتمكن النموذج عند المستقبل من فعل الشيء المطابق . يبدو هذا التصور فعالاً للغاية وسيكون اختراعاً عظيماً إذا استطاع أحد ما تحديد طريقة تنفيذ العمليات التي أتيت على ذكرها . ولكن ما أسهل الأمنيات وما أصعب القفل ( ينطبق ذلك على تأليف السيمفونية العاشرة لبيتهوفن ، أو تقليد لوحة كبيرة على شيء ما ، وكذلك على اختراعنا المنشود ) .

لقد أصبحت آمال الناس غير المتحققة ، في عصرنا هذا عصر التطور العلمي والتكنولوجي غير المحدود ، ذات أهمية قصوى لدرجة تم معها استخدام مصطلح خاص للتعبير عن هذه الأحلام . هذا المصطلح هو الاختراق . تستخدم هذه الكلمة أحيانا لوصف شيء غير مهم البتة وتافه ، قد تم انجازه فعلا .

إذا وضعنا جانبا أحلام المستقبل نجد أن كل نظم إرسال الصور تتبع نمودجا واحدا . يتم مسح الصورة المراد إرسالها لاكتشاف شدة الإضاءة عند مختلف نقاطها ويجري ذلك عبر سلسلة من الخطوط المتوازية والمتقاربة ، وفي حالة التلفزيون الملون تقرأ ثلاثة أطراف بالوان مختلفة في وقت واحد . تحدث عند المستقبل العملية العاكسة اذ يتم طبع النقطة الضوئية على نماذج مطابقة من الخطوط وفق شدة الإشارة القادمة والمتناسبة بدورها مع شدة اضاءة النقطة عند المصدر . تقتصر كل المحاولات التي جرت حتى الآن للترميز الفعال على طريقة المسح هذه .

يستخدم التلفزيون الملون طريقة ترميز متقدمة للغاية ، فشدة اضاءة الصورة في هذه الحالة دقيقة جدا ، بينما نموذج اللون اقل تفصيلا . وهكذا يمكن إرسال الصورة التلفزيونية الملونة المطابقة بتفاصيلها لصورة غير ملونة عبر نفس قناة الإرسال لهذه الأخيرة . يستخدم التلفزيون الملون ، كما هو معروف ، إشارة تمثيلية أو تشبيهية ، اذ أن الصورة لا تختزل الى نبضات قطع ووصل منفصلة .

سيزداد بالتدريج استخدام تعديل ترميز النبضات لإرسال كل أنواع الاشارات بما فيها اشارات التلفزيون . سيتم مسح الصورة بالطريقة المعتادة ، الا أن شدة اضاءتها سترمز في سلسلة من الأرقام الثنائية التي تحدد شدة اضاءة عناصر متجاورة منفصلة من الصورة يسمى كل منها : بيكسيل وتقع جميعها على خط واحد . كانت هذه هي طريقة إرسال الصور من المركبات التي أمّت كوكبي المريخ والمشتري .

ان كل طرق الترميز التلفزيوني الفعال هي من النوع الرقمي . تتعامل هذه الطرق مع سلسلة من الأرقام الثنائية المثلة لاضاءة كل بيكسيل من خط معين .

تتغير شدة الاضاءة في مساحات كبيرة من شاشة التلفزيون بشكل متدرج وناعم من بيكسيل لبيكسيل . يمكن ، عبر هذه المساحات ، التنبؤ من اضاءة البيكسيل التالي ، من خلال المعلومات المتوفرة عن اضاءة كل بيكسيل سابق في نفس الخط وربما في الخط السابق . ان كل ما تلزمنا معرفته عند المستقبل هو الخطأ في هذا التنبؤ ، لذا فما نقوم بإرساله هو الفرق بين شدة الاضاءة الحقيقية والشدة التي نتوقعها عند المصدر والمستقبل . سيكون التنبؤ بشكل ما سيء في المناطق المشغولة من الصورة ، لذا يصبح الفرق المرسل عندها كبيراً .

يمكننا ترميز فروق الاضاءة بأكثر ما يمكن من الكفاءة والفعالية باستخدام طريقة هوفمان وبحيث تمثل الرموز القصيرة فروق شدة الاضاءة الصغيرة الأكثر تواتراً ، بينما تمثل الرموز الطويلة الفروق الأكبر والأقل تواتراً . يؤدي تنفيذ هذا المخطط الى توليد الأرقام الثنائية الممثلة لفروق شدة الاضاءة بسرعة متباينة ، اذ ستكون تلك السرعة منخفضة عند مسح المناطق المتدرجة الاضاءة من الشاشة ، وعالية في المناطق المشغولة من الشاشة . يجب ان تغذي هذه الأرقام الى منظم معلوماتي بغية ارسالها بسرعة ثابتة ، اذ يخزن هذا المنظم الأرقام الواردة اليه ثم يعيد ارسالها وفق السرعة الثابتة المساوية للسرعة الوسطية التي تتدفق وفقها المعلومات اليه . يجب استخدام منظم معلوماتي مماثل عند المستقبل .

يرتّب استخدام هذا النظام في الترميز ، بهدف تحقيق ارسال تلفزيوني جيد ، تخفيض عدد الأرقام الثنائية اللازمة في كل ثانية بنسبة  $\frac{1}{2}$  الى  $\frac{1}{3}$  بالمقارنة مع عدد الأرقام الثنائية المستخدمة في حالة ترميز شدة الاضاءة عند كل بيكسيل .

يمكن تحقيق نجاح أكبر بتخزين شدة الاضاءة عند كل بيكسيل من الصورة السابقة واستخدامها من ثم في عملية التنبؤ عن شدة الاضاءة في

البيكسيل التالي المبغى ارساله ، وتظهر فعالية هذه الطريقة اكثر عندما نرسل صورة تجمع من الناس على خلفية ثابتة ، اذ لا تتغير شدة اضاءة كل بيكسيل من الخلفية لدى الانتقال من صورة لآخرى .

تستخدم بعض النماذج التجريبية الاعداد حقيقة ان حركة شكل ما على خلفية معينة تتم بإيقاع اجمالي . وهكذا يمكن التنبؤ بشدة اضاءة كل بيكسيل في الشكل المتحرك من اضاءة بيكسيل آخر على بعد ثابت في الصورة السابقة .

اذا مثل كل بيكسيل من الصورة التلفزيونية بـ ٨ ارقام ثنائية ( في حالة صورة ممتازة ) ، فيمكن ارسال هذه الصورة باستخدام ١٠٠ مليون رقم ثنائي في كل ثانية . واذا استخدمنا التطويرات في الترميز التي اشرنا اليها للتو ينخفض هذا الرقم الى ٣٢ مليون وقد تم تخفيضه في بعض الحالات الى ٦ مليون فقط . وتدل بعض الدراسات الى إمكان تخفيضه الى رقم ادنى بحدود ١٥ مليون في بعض الحالات الخاصة كصورة وجه على خلفية ثابتة .

هناك طريقة أخرى للإرسال الفعال للصورة التلفزيونية هي طريقة التحويل . يتم وفق هذه الطريقة تمثيل كل بيكسيل من صورة تلفزيونية او من جزء منها كمجموع عناصر مختارة من نماذج قياسية . ويتم ارسال ساعاتها بدقات منتقاة .

نراجع ما استعرضناه حتى الآن . هناك ثلاثة مبادئ لترميز الإشارات بشكل فعال :

١ - لا نرسم الإشارة بمعدل عينة او حرف في وقت ما ، بل نرسم ما امكن من امتداد الإشارة .

٢ - نعتبر القيود الخاصة بمصدر الإشارة .

٣ - نأخذ بعين الاعتبار محدودية العين والأذن في تقضي الاخطاء عند إعادة تشكيل الإشارة .

يتضمن مرمز الأصوات هذه المبادئ بشكل جيد . لا يتم تفحص الشكل الآن لموجة الصوت بكل تفاصيلها . يرسل بدلاً من ذلك توصيف للشدات المتوسطة عبر مجال معين مرسل من التواترات ، إلى جانب إشارة أخرى تبين الأحرف الصوتية ، وطبقة الصوت لها . يعد هذا الترميز فعالاً بما فيه الكفاية لأن أعضاء التصويت لا تغير أماكنها بسرعة أثناء توليد الأصوات . يولد مرمز الأصوات عند المصدر إشارة صوتية لا تشابه في تفاصيلها الإشارة الأصلية ولكنها تشبهها بشكل عام ، وذلك بسبب القصور الطبيعي لحس السمع لدينا .

يمثل مرمز الأصوات نموذجاً مثالياً لأجهزة الإرسال الفعال . يأتي بعده ربما التلفزيون الملون حيث تعرف تغيرات الألوان عبر الصورة بحدّة أقل من تغير الشدات . يعتمد ذلك على قصور العين عن مشاهدة التفاصيل في الصورة الملونة .

يجب على فن الاتصالات المعاصر ، بعيد ذلك ، أن يستخدم وسائل تعتبر وفق نظرية الاتصالات غير فعالة بما فيه الكفاية ، ذلك لأنها لا ترمز امتدادات طويلة من الإشارة في وقت ما .

ويبقى الترميز الفعال هاماً للغاية ، ويتجسد ذلك بشكل خاص في حالة إرسال الإشارات ذات الحزم العريضة نسبياً ( تلفزيون أو إشارات صوتية ) عبر الدارات الباهظة التكاليف ككوابلات الهاتف عبر المحيط .

لا شك أن المستقبل سيشهد طرقاً أكثر فعالية في الترميز وستتحقق نتائج باهرة ، إلا أن علينا الحذر في المضي بعيداً أكثر مما ينبغي .

لنتخيل مثلاً أننا نرسل نصاً إنكليزياً حرفاً بحرف . إذا ارتكبنا بعض الأخطاء في إرسال عدد من الأحرف ، نستطيع رغم ذلك استرجاعها من النص :

Here I have replaced a few vowels by o.

يمكننا استبدال الأحرف الصوتية بحرف x والحصول على :

Hxx x hxx rxplxxd thx wxwxs bx x.

إذا رمزنا النصوص اللغوية كلمة بكلمة يكون الترميز أكثر فعالية ، وإذا ارتكبنا خطأ في هذه الحالة أثناء الإرسال ، لا نكون في واقع الأمر قد حصلنا على كلمة مهجأة بشكل خاطئ وكل ما في الأمر أن كلمة قد حلت محل أخرى . يمكن أن يترتب على ذلك بعض التعقيد ، مثلاً استبدال جملة مثل : هطل الثلج في الشتاء ، بجملة أخرى هي : هطل الثلج في الصيف .

طبعاً يمكن أن نكتشف الخطأ بملاحظتنا أن الكلمة غير مناسبة . ولكن لنفرض أننا استخدمنا ترميزاً مغايراً لا يمكنه إلا استرجاع التراكيب الإمبرائية وحسب ، عندها ستكون فرصتنا قليلة للغاية في اكتشاف أي خطأ في الإرسال .

تتصف النصوص اللغوية ومعظم مصادر المعلومات الأخرى بالفزارة ، إذ أنها تقدم بدائل متعددة للمستقبل . إذا وقعت بعض الأخطاء الناجمة عن استبدال أحرف بأخرى ، فلا يعني ذلك أن الرسالة قد دمرت ، إذ نستطيع استنتاج الأحرف غير الصحيحة من الأحرف التي تم إرسالها بشكل صحيح . ولعله هذا هو السبب ، أي الفزارة ، في أن كلا منا يستطيع قراءة ما كتبه الآخر بيده . عندما ترسل إشارة مستمرة وفق عينات عند لحظات زمنية معينة تتسبب الأخطاء في ساعات الإشارات بعض القرقعة في الصوت المرسل أو بعض البقع في الصورة المبتوثة .

لقد كان هدفنا الأول حتى الآن هو إزالة هذه الفزارة ، بحيث نتمكن من إرسال أقل عدد ممكن من المؤشرات الهامة التي يمكن بواسطتها استعادة الرسالة . ولكننا نستنتج استناداً ما قدمناه ، أن النجاح الكامل في تحقيق هذا الهدف سيعرض الرسالة المبتوثة لخطر الضياع ، إذ

أن أي خطأ في الإرسال سيرتب وصول رسالة خاطئة برمتها وليست مشوهة وحسب . أما إذا فشلنا في تحقيق هدفنا المثالي بمقدار ضئيل ، فإن خطأ الإرسال سيترك أثراً كبيراً جداً على الرسالة المبتوتة دون تدميرها .

نعلم جميعاً أن هناك القليل من الضجيج في الإرسال الكهربائي ، ويتمثل بهسيس في الراديو ويقع للجية في التلفزيون ، وعلينا أن نضيف إلى معلوماتنا أن مثل هذه الظاهرة هي من أصل الطبيعة ولا يمكن التخلص منها بشكل نهائي . هل يمكن لذلك أن يفسد خطتنا من حيث الأساس ، تلك الخطة الهادفة لترميز الرسائل التي يولدها مصدر للإشارات في عدد من الأرقام الثنائية أكبر بقليل من انتروبي المصدر .

سنتناول هذا الموضوع في الفصل القادم .





## الفصل الثامن

### القناة فارت الضجيج

من الصعب أن يضع أحدا نفسه مكان آخر ، وعلى الاخص أن يضع نفسه مكان من عاش في ازمان غابرة . ماذا يمكن أن يكون شأن شخص من العصر الفيكتوري مع الازياء المعاصرة ، وهل كانت قوانين نيوتن في الحركة والثقالة مدهشة لمعاصريه كما كانت نظرية اينشتين مدهلة بدورها بالنسبة لمعاصري اينشتين . ما هو الشيء المحير في النسبية . ان الطلبة المعاصرين يتقبلونها دون تعليق وبشيء من الحتمية ، كما لو أن افكارا اخرى هي الغريبة والمدهشة والتي لا يمكن تفسيرها .

إن سبب ذلك ، بشكل جزئي ، هو أن موافقنا وليدة محيطنا وعصرنا ، ولأنه ، في حالة العلم على الاقل ، تأتي الافكار المحدثه كاستجابة لأسئلة مستجدة أو مصلفة بشكل اكثر دقة . نتذكر انه وفق افلاطون ، استطاع ارططوا استجرار برهان هندسي من أحد أتباعه ببساطة عن طريق طرح بعض الاسئلة العبقريه . لا يحتمل أن يتوصل الى إجابة مناسبة مهما كانت ، أي من الذين لم يطرحوا على أنفسهم اسئلة معينة ، وعندما يصاغ السؤال من خلال الإجابة الكامنة في الدماغ ، يبدو الجواب في منتهى الوضوح .

لقد تنبه العاملون في الاتصالات منذ البداية الى حقيقة أن الدارات أو الاقنية ليست كاملة . نحن نستمع في الهاتف أو الراديو الى الإشارة المطلوبة على خلفية من الضجيج ، سواء اكان عاليا أو خافتا ، والذي

يختلف من قرعة الكهرباء الساكنة الى الهيسيس المستمر ، أما في التلفزيون فتبدو الصورة متوضعة على خلفية من البقع الثلجية الخفيفة أو القوية . كذلك يختلف الحرف المستقبل عن الحرف المرسل في البث البرقي .

نفرض أن أحدا قد سأل مهندساً للاتصالات عام ١٩٤٥ من ضوء الضجيج ، ولربما صاغ السؤال في الجملة التالية : ما الذي يمكن فعله انزاء الضجيج ، من المحتمل أن جواب المهندس كان سيأتي على النحو : فرد من استطاعة المصدر أو اجعل المستقبل أقل ضجيجا ، وتأكد من أن المستقبل سيكون أقل حساسية لتغيرات التواترات الغير متضمنة في الإشارة .

عندها يمكن ان يكون السائل قد عاد للالاحاح : إلا يمكن أن نفعل اي شيء آخر ، ولا يتوانى مهندس عام ١٩٤٥ عن الاجابة السريعة بقوله : استخدام تعديل التواترات الذي يطال حزاما اعرض ، وبهذا تقلل من اثر الضجيج .

لنفرض ان الجدل قد استطرد ، وان السائل طرح السؤال التالي : يمكن أن يترتب على الضجيج ، لدى بث رسالة من لوحة ازرار ، وصول بعض الاحرف الى المستقبل بشكل خاطيء ، كيف يمكن ان نتحاشى ذلك من الممكن أن تكون اجابة مهندسنا مصاغة على النحو التالي : اعرف انني اذا استخدمت خمسة نبضات قطع او وصل لتمثيل رقم ثنائي ، واصطلحت ان التركيب المكون من ثلاثة نبضات قطع ونبضتي وصل هو الذي يمثل الرقم الثنائي ، لا يمكنني في بعض الحالات تحديد الخطأ مثلا عندما تحتوي الإشارة المستقبلية على عدد من نبضات الوصل اقل او اكبر من اثنين .

من الممكن أن سائلنا قد تابع الموضوع الى حد أبعد بعرضه المشكلة الآتية : نفرض أن دارات لوحة الازرار تسبب الاخطاء ، هل هناك من طريقة لا يصلح الرسالة الى هدفها . اما رد المهندس ، فكان على الأرجح : أعد البث عدة مرات ، إلا أن هذا مضيعة للجهد . اصلح الدارات المعطوبة

تقرب هنا شيئاً فشيئاً من الأسئلة التي لم تطرح قبل شانون .  
 الا أننا قبل التعرض لها سنتابع سيناريو حوارنا الافتراضي بأن نمطي  
 للسائل دور الكلام بسؤاله : افرض أنني اخبرتك بخصوص ترميزي  
 الجيد لرسالتي وأنني ارسلتها عبر قناة ذات ضجيج بنسبة مهمة  
 تماماً من الاخطاء ، وكانت نسبة اقل من أي قيمة محددة . وافرض  
 اكثر من ذلك أنني اخبرتك أن معرفتي بنوعية وشدة الضجيج في الدارة  
 مكنتني من حساب عدد الاحرف الممكن ارسالها عبر القناة في كل  
 ثانية وإن ارسال عدد من الاحرف عبر الدارة اقل من العدد المحسوب  
 سيتم افتراضياً دون خطأ ، بينما اذا زاد عدد الاحرف المرسل عن  
 العدد المحسوب ، أصبح الوقوع في الخطأ محتملاً .

يستمر السيناريو باجابة مهندس عام ١٩٤٥ : الافضل ان تريني  
 ما تفعل . لم افكر بهذه الطريقة من قبل ، واعتقد على كل حال ان ما تقوله  
 غير محتمل عموماً ، اذ أن ازدياد الضجيج يفضي الى ازدياد الخطأ ،  
 كما ان اعادة البت عدة مرات سيحسن الوضع في حالة عدم وجود كمية  
 كبيرة من الاخطاء . ولكن يبقى كل هذا مكلفاً للغاية هل من الممكن ان  
 ينطوي كلامك على مغزى ما ، اذا تحقق وجود ذلك المغزى فساصبح في  
 حيرة من امري . يا لطريقة عرضك هذه .

ومهما ذهبنا في السيناريو ابعد من ذلك فلن نجد الا مزيداً من اخطاء  
 المهندس الذي ضلته طريقة التناول السابقة . وما نود تثبيته هنا ان  
 المهندسين والرياضيين الذين عاصروا الفترة الانتقالية يشتركون جميعاً  
 بمشاعر واحدة ازاء اعمال شانون في حقل ارسال المعلومات عبر قناة ذات  
 ضجيج . انها مشاعر الدهشة والاعجاب . الا أنني أعرف رجلاً غير  
 متخصص لم يجد في تلك الاعمال ما يدهش ، فما عساني فاعل ازاء مثل  
 هذا الموقف .

ربما ان أحسن طريقة لتناول الموضوع هي تلك التي تعرض لمشكلة  
 القناة ذات الضجيج كما نفهمها اليوم . ومهما كان من رفع الأسئلة  
 واجابتها ومهما بدا الحوار طبيعياً ومفروضاً ، فالقضية برمتها تنتمي

لمرحلة ما بعد شانون وإن كان على القارئ أن يتمجب أو لا يتمجب فهذا هو شأنه وله الخيار في ذلك .

لقد قدمنا حتى الآن عرضاً للأساليب البسيطة والصعبة على حد سواء والهادفة لترميز النصوص والاعداد لتحقيق الارسال الفعال والكفؤ ورأينا كيف يمكن تمثيل اشارة كهربائية عرض حزامها س بعينات أو سعت عددها ٢ س في الثانية مأخوذة في لحظات تفصل بينها فترات زمنية بطول <sup>١</sup> ثانية. كما سبق واستنتجنا أن استخدام تعديل ترميز النبضة، ٢ س

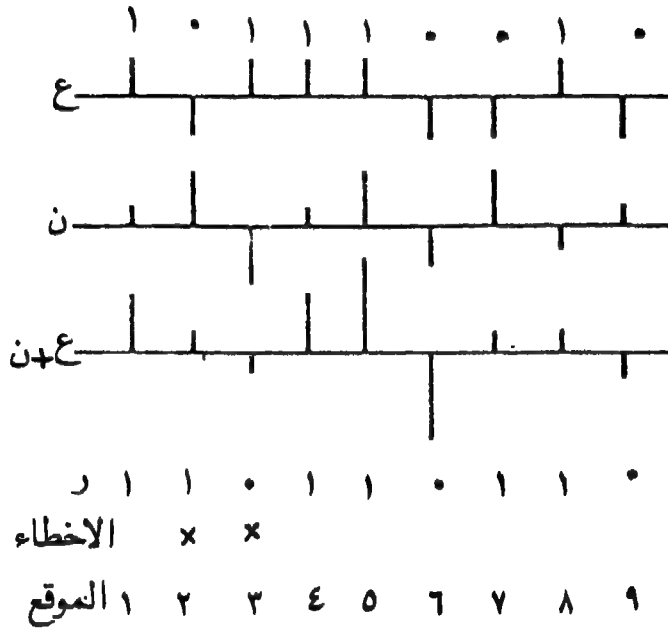
يفضي الى توظيف حوالي ٧ ارقام ثنائية لتمثيل سعة كل عينة . وهكذا فبالجاء الى تعديل ترميز النبضات أو أي منهج آخر معقد وفعال ، نستطيع بث اشارات الاصوات أو الصور عبر سلسلة من الارقام الثنائية أو نبضات القطع والوصل ، أو النبضات الكهربائية السالبة والموجبة .

تؤكد صحة كل ما تقدم اذا استلم المستقبل نفس الاشارة التي صدرت عن المرسل ، الا ان الواقع العملي يختلف عن ذلك ، فالمستقبل قد يستلم في بعض الاحيان . اذا كانت الاشارة الصادرة ١ ، واذا كانت الاشارة الصادرة . يمكن ان ينجم ذلك عن أعطال القواطع الكهربائية في الدارات السريعة . كذلك قد يحصل الخطأ بسبب تداخل الاشارة والضجيج ، سواء اكان ضجيجا من جهاز مصنوع أو من العواصف المغناطيسية .

نستطيع ان نبين من خلال حالة بسيطة كيف تحدث الاخطاء بسبب تداخل الاشارة والضجيج . لنفرض اننا نرغب بارسال عدد كبير من الارقام الثنائية . أو ١ في كل ثانية عبر سلك باستخدام اشارات كهربائية يمكننا تمثيل الاشارة الناقلة لهذه الارقام بمتتالية من العينات ع كما في الشكل ٨ - ١ ، حيث تكون كل عينة اما + ١ أو - ١ يتوفر لنا هنا سلسلة من المكونات السالبة والموجبة الممثلة للارقام الثنائية .

١٠ ١١١ ٠٠ ١٠

نفرض الآن اننا اضعنا الى الاشارة كمون ضجيج عشوائي قد يكون موجباً وقد يكون سالباً . يمكننا ان نمثل ذلك ايضاً بعدد من عينات الضجيج ن المأخوذة بشكل متواقت مع العينات ع كما في الشكل ٨ - ١ . يعرض نفس الشكل الاشارة المركبة من الضجيج والاشارة الاصلية ع + ن .



الشكل ٨ - ١

اذا فرنا الاشارة الموجبة المستقبلية والمكونة من الاشارة الاصلية والضجيج على أنها ١ ، بينما فرنا السالبة على أنها ٠ . فان الرسالة المستقبلية الكلية ستكون من ر رقم ثنائي حسب ما يبدو في الشكل ٨ - ١ وستنحصر اخطاء الارسال في المواقع : ٢ ، ٣ ، ٧ .

يتراوح تأثير الاخطاء هذه بين الازعاج وخطر قلب مفهوم الرسالة وتتجلى في حالة ارسال الاصوات او الصور وباستخدام طرق الترميز



يؤدي هذا الأسلوب الى تخفيض سرعة ارسال حتى نصف قيمتها ،  
اذ يتوجب علينا على الدوام التوقف وارسال كل رقم مرة ثانية . الا  
اننا نستطيع ان نرى من خلال الاشارة المستقبلية الخطأ الواقع عند  
النقطة المشار اليها ، فعوضاً عن وصول اشارتين متماثلتين .. او ١١ ،  
نحصل على زوج غير متماثل : ٠١ ، ولكننا لا نستطيع تحديد الاشارة  
الصحيحة الصادرة .. او ١١ لقد اكتشفنا الخطأ ولم نستطيع تصحيحه .

اذا لم تكن الاخطاء متواترة ، أي اذا كان احتمال وقوع خطاين  
عند ارسال ثلاثة ارقام متتالية مهملًا ، يمكننا كشفه وتصحيح الخطأ  
بارسال كل رقم ثلاث مرات ، حسب المثال التالي :

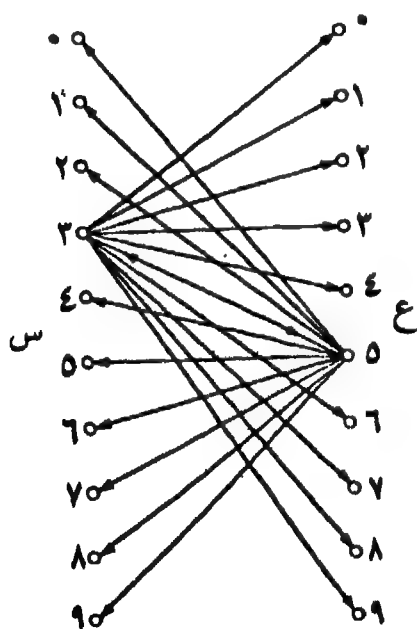
مرسل	١	١	١	٠	٠	٠	١	١	١	٠	٠	٠	٠	٠	٠	٠	٠
مستقبل	١	١	١	٠	٠	٠	١	٠	١	٠	٠	٠	٠	٠	٠	٠	٠
								↑									
								خطأ									

لقد خفضنا سرعة الارسال حتى الآن الى الثلث ، لاننا سنتوقف عند  
كل ارسال مرتين بهدف تكرار ارسال الحرف ثلاثة مرات ، الا اننا  
نستطيع تصحيح الخطأ استناداً لحقيقة ان الارقام في الزمرة الثلاثية  
١٠١ ليست متشابهة . فاذا فرضنا ان هناك خطأ واحداً في ارسال ارقام  
هذه الزمرة ، لوجب ان تكون هذه الزمرة على الشكل ١١١ ، ممثلة لـ  
١ وليست ٠٠٠ ممثلة لـ ٠ .

نجد هنا ان طريقة تكرار ارسال الارقام كفيلة بكشف وتصحيح  
الاخطاء القليلة الحدوث اثناء الارسال ، ولكن ما هي تكاليف هذه  
الطريقة ؟ اذا استخدمناها لكشف وتصحيح الاخطاء فستنخفض سرعة  
الارسال الى النصف اذا كررنا الارسال مرتين الى الثلث اذا كررناه  
ثلاثة مرات ، كما ان هذه الطريقة تصبح عديمة الجدوى اذا كانت  
الاخطاء متواترة لدرجة وقوع اكثر من خطأ واحد عند ارسال رقمين او  
ثلاثة .

من الواضح أن هذه الطريقة لن تقود اطلاقا الى فهم صحيح لامكانية تصحيح الأخطاء . ان ما يلزمنا في هذا المجال اداة رياضية عميقة وفعالة لقد استطاع شانون الحصول على هذه الاداة من خلال اكتشافه وبرهانه لنظريته الاساسية عن القناة ذات الضجيج . وسنتبع فيما يلي اسلوب معالجته للموضوع .

سنعتبر حالة جملة اتصالات متقطعة حيث يتم ارسال زمرة من الأحرف أو الأرقام العشرية من ٠ حتى ٩ ، وذلك بهدف الحصول على نموذج مجرد وعام للضجيج والأخطاء . ولتبسيط الامر نعتبر مصدر ارسال يبث الأرقام العشرية فقط ، وهذا ما يوضحه الشكل ٨ - ٢ .



الشكل ٨ - ٢





لحرف معين . دعونا الآن نتناول موضوع قناة الاتصال ذات الضجيج بشكل أكثر شمولاً . لتحقيق هذا الهدف نستخدم الحرف س لتمثيل الأحرف المرسل والحرف ع لتمثيل المستقبل .

تشكل الأحرف س المجموعة المولدة عن مصدر الإرسال . إذا كان عدد هذه الأحرف هو م وكان احتمال ورود كل منها مستقلاً عما سواه ومساوياً لـ  $\frac{1}{M}$  ، تكون سرعة توليد المصدر للمعلومات أي الانتروبي الخاصة به كما تعلمنا سابقاً .

$$H(S) = - \sum_{E=1}^M \frac{1}{M} \log_2 \left( \frac{1}{M} \right)$$

نعتبر خرج الجهاز ، والذي نستخدمه بالحرف ع ، على أنه مصدر رسائل آخر . لا يساوي عدد الأضواء عدد المفاتيح بصورة عامة ، إلا أننا سنفترض ذلك ، وهكذا سيكون هناك م ضوء ، وبدا تساوي انتروبي الخرج :

$$H(E) = - \sum_{E=1}^M \frac{1}{M} \log_2 \left( \frac{1}{M} \right)$$

نلاحظ أنه بينما يعتمد  $H(S)$  على دخل قناة الاتصال فقط ، يتوقف  $H(E)$  على نفس الدخل وعلى أخطاء الإرسال إضافة لذلك ، وهكذا فاحتمال إنارة الضوء في حالة قصر الإرسال على ضغط المفتاح فقط يختلف عن احتمال إنارة الضوء في حال ضغط المفاتيح بشكل عشوائي .

إذا افترضنا أن بإمكاننا مراقبة المرسل والمستقبل معاً ، لاستطعنا اكتشاف تواتر تركيب معين من س ، ع ، مثلاً كم مرة أدى إرسال ٤ إلى استقبال ٦ ، أو إذا عرفنا الخصائص الإحصائية للمصدر والمستقبل لتمكننا من حساب هذه الاحتمالات ومنها نستطيع حساب انتروبي أخرى :

$$ت (س ، ع) = \sum_{س=1}^2 \sum_{ع=1}^2 - ح (س ، ع) \times ل ع ح (س ، ع)$$

وهي تمثل الرتبة في اقتران زوج معين س ، ع .

نذهب الآن أبعد من ذلك ؛ فنفرض أننا نعرف س ، أي أننا نعرف أي المفاتيح تم ضغطه ، ما هو احتمال اضاءة مختلف الاضواء في هذه الحالة ، كما يتوضح بالاسهم على يمين الشكل ٨ - ٢ . يقود ذلك الى الانتروبي التالية :

$$ت (ع) = \sum_{س=1}^2 \sum_{ع=1}^2 - ح (س) \times ل ع ح (س ، ع)$$

وهي انتروبي شرطية للرتبة ، ويذكر شكلها بانتروبي الآلة المتناهية الحالات ، وكما في تلك الآلة ، نضرب الرتبة لحالة معينة ( الحالة هنا قيمة س ) باحتمال ان تلك الآلة ستحقق ثم نجمع عبر كل الحالات الممكنة.

نفرض اخيرا أننا نعرف أي الاضواء سيشتع . نستطيع تحديد احتمالات ضغط مختلف المفاتيح ، وهذا بدوره يقود الى انتروبي شرطية اخرى :

$$ت (س) = \sum_{س=1}^2 \sum_{ع=1}^2 - ح (ع) \times ل ع ح (س) \times ل ع ح (س ، ع)$$

وهي عبارة عن المجموع لكل قيم ع لاحتمال استقبال ع مضروبا في الرتبة المقابلة لاحتمال ضغط المفتاح س عند تلقي الضوء ع .

تعتمد كل حسابات الانتروبي هي على الخصائص الاحصائية للمصدر لانها تتوقف على تواتر ارسال أو تواتر استقبال ع ، كذلك على اخطا الارسال .

ان افضل تفسير لكميات الانثروبي المحسوبة اعلاه هو ذلك الذي  
يعتبرها ممثلة للريبة المرتبطة بتوليد الاحرف عند المصدر وتلقيها عند  
المستقبل ، وهكذا نثبت ما يلي :

ت ( س ) : الريبة بالنسبة ل س ، بمعنى اي الاحرف سيتم  
ارساله .

ت ( ع ) : الريبة المتعلقة بالحرف الذي سيتم استقباله في حالة  
اعتبار مصدر رسائل معين وقناة ارسال محددة .

ت ( س ، ع ) الريبة في حالة ارسال س ، واستقبال ع .  
ت ( ع ) الريبة في استقبال ع عند ارسال س ، وهي متوسط الريبة  
س  
بالنسبة للمرسل فيما يتعلق بالحرف الذي سيتم استقباله .

ت ( س ) الريبة في ارسال س عند استقبال ع ، وهي متوسط  
ع  
الريبة بالنسبة للمستقبل فيما يتعلق بالحرف الذي ارسل .

ترتبط هذه الكميات فيما بينها ببعض العلاقات :

$$ت ( س ، ع ) = ت ( س ) + ت ( ع ) س$$

اي ان الريبة في حالة ارسال س واستقبال ع تساوي مجموع الريبة  
في س والريبة في استقبال ع عند ارسال س .

$$ت ( س ، ع ) = ت ( ع ) + ت ( س ) ع$$

اي ان الريبة في حالة ارسال س واستقبال ع تساوي مجموع الريبة في  
ع والريبة في ارسال س عند استقبال ع .

نلاحظ أنه إذا ساوت  $t$  (ع) للصفر فإن  $t$  (س) ستساوي  
 $t$  (س) ع  
 الصفر في نفس الوقت وإذا ذلك تساوى  $t$  (س) مع  $t$  (ع) ، وهذه  
 هي حالة القناة بدون ضجيج حيث تتساوى انتروبي الإشارة الصادرة  
 مع انتروبي الإشارة المستقبلية ، ويعرف المرسل أي الأحرف سيصل ،  
 وكذا المستقبل يعرف أي الأحرف أرسل .

بدو الريبة  $t$  (س) أي الريبة في الحرف المرسل عند استقبال  
 $t$  ع  
 حرف معين ، كمقياس طبيعي للمعلومات المفقودة عبر الإرسال . هذا  
 هو الواقع فعلاً ، لذا أعطيت هذه الانتروبي تسمية خاصة : الالتباس في  
 قناة الاتصال . إذا اعتبرنا كل من  $t$  (س) ،  $t$  (ع) كانتروبي مقدرة  
 ع  
 بالبيت في الثانية ، يمكننا أن نبرهن أن سرعة إرسال المعلومات عبر  
 القناة هي :

$$\text{سر} = t \text{ (س)} - t \text{ (ع)} \text{ ع}$$

وهكذا تساوي هذه السرعة سرعة بث المعلومات من المصدر مطروحاً  
 منها الالتباس في القناة ، أي انتروبي المصدر مطروحاً منها ريبة المستقبل  
 فيما يتعلق بالحرف المرسل .

تساوي هذه السرعة أيضاً :

$$\text{سر} = t \text{ (ع)} - t \text{ (س)} \text{ س}$$

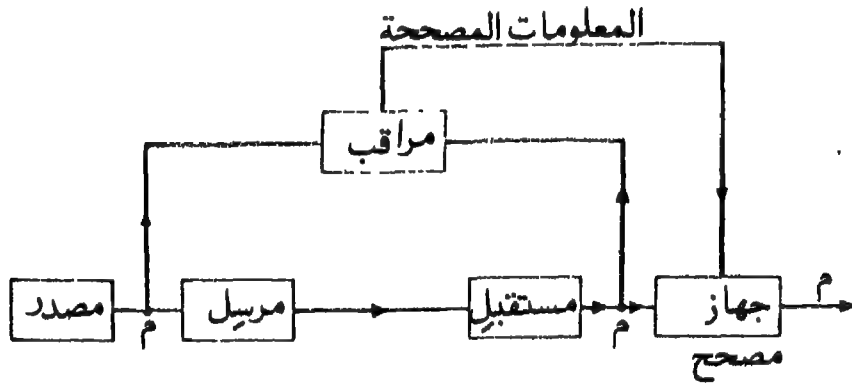
بكلمة أوضح ، حاصل طرح ريبة المرسل فيما يتعلق بالحرف الواصل  
 من انتروبي المستقبل .

وأخيراً تعطى هذه السرعة بالعلاقة :

$$\text{سر} = t \text{ (س)} + t \text{ (ع)} - t \text{ (س، ع)}$$

اي مجموع انتروبي المصدر وانتروبي المستقبل مطروحاً منه الريبة  
في ارسال س واستقبال ع . نلاحظ انه من اجل قناة خالية من الضجيج  
يكون  $C = S$  مساوياً للصفر الا في حالة  $S = E$  وبالتالي :  
ت  $(S, E) = S$  ،  $(S, E) = S$  ، وتكون سرعة ارسال المعلومات هي  
نفسها انتروبي المصدر  $(S)$  .

يوضح شانون معنى هذه السرعة بالشكل ٨ - ٣ . نفرض هنا مراقبة  
يلاحظ الاشارة المرسل والمستقبلية ويقارن بينها ثم يرسل التصحيح  
المطلوب للاشارة المستقبلية . يبرهن شانون ان تصحيح الاشارة يستلزم  
تساوي انتروبي الاشارة المصححة مع الالتباس في القناة .



الشكل ٨ - ٣

نلاحظ ان سرعة ارسال المعلومات  $(S)$  تعتمد على القناة وعلى  
المصدر . كيف نستطيع توصيف السعة الخاصة بارسال المعلومات في  
حالة قناة غير كاملة او ذات ضجيج . نستطيع اختيار المصدر بحيث  
تكون السرعة  $S$  اكبر ما يمكن لقناة ارسال معينة . تدعى هذه القيمة  
العظمى بسعة القناة ، ونرمز لها برمز مناسب هو  $C$  .

تتضمن نظرية شانون للقناة ذات الضجيج السعة  $S$  ، وتنص على :  
 نفرض مصدراً متقطعاً ذي أنثروبي ت وقناة إرسال متقطع سعتها  $S$  .  
 إذا كانت  $T > S$  ، نستطيع إيجاد نظام ترميز بحيث يمكن إرسال  
 خرج المصدر عبر القناة بتواتر صغير جداً من الأخطاء أي بالالتباس  
 صغير ، أما إذا كانت  $T < S$  فيمكن عندها ترميز المصدر بحيث يكون  
 الالتباس القناة أقل  $T - S$  ، حيث  $L$  عدد صغير جداً . لا توجد  
 أي طريقة للترميز يمكنها جعل الالتباس القناة أقل من  $T - S$  .

هذه هي الصيغة التي أدهشت الرياضيين والمهندسين . كلما ازدادت  
 احتمالات الأخطاء في الإرسال ، أي كلما تواترت الأخطاء ، انخفضت ، وفق  
 شانون ، سعة القناة بشكل مطرد . مثلاً إذا اعتبرنا نظاماً مرسلًا للأرقام  
 الثنائية وكان بعضها خاطئاً ، فإن سعة القناة  $S$  ، أي عدد وحدات  
 البيت من المعلومات المقابلة لكل رقم ثنائي مرسل ، سيتناقص . إلا أن  
 سعة القناة تتناقص كلما تواترت الأخطاء في بث الأرقام ، وهكذا فلكي  
 نبقى في حدود أقل ما يمكن من الأخطاء علينا أن نأخذ سرعة الإرسال بحيث  
 تكون مساوية لسعة القناة أو أقل من تلك السعة .

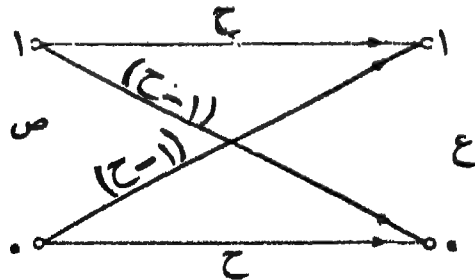
كيف نستطيع تحقيق هذه النتيجة ؟ نستذكر أن الترميز الفعال  
 لمصدر معلوماتي يستلزم دمج عدد كبير من الأحرف مع بعضها وترميز  
 الرسالة كمجموعة من التراكيب الطويلة . ينطبق هذا على الاستخدام  
 الفعال للقناة ذات الضجيج ، إذ يجب أن نتعامل مع تراكيب طويلة من  
 الأحرف المستقبلية ، بحيث يتألف كل تركيب من أكبر عدد ممكن من  
 الأحرف . وما سيحدث ، هو أنه من بين كل التراكيب الممكنة ، سيقصر  
 الإرسال والاستقبال على التراكيب التي يمكن أن ترد باحتمال غير مساو  
 للصفر .

يبحث شانون ، بهدف برهان نظريته المدرجة أعلاه ، عن القيمة  
 الوسطية لتواتر الخطأ لكل أساليب الترميز الممكنة ، أي لكل الارتباطات  
 الممكنة بين تراكيب دخل وتراكيب خرج معينة ، وذلك عندما يتم انتقاء

الرموز بشكل عشوائي ، ثم يمضي شانون ليثبت أنه عندما تكون سعة القناة أكبر من انتروبي المصدر فإن وسطي سرعة الخطأ مقدراً من أجل كل أساليب الترميز هذه يقترب من الصفر كلما ازداد طول التركيب . إذا استطعنا الحصول على هذه النتيجة الجيدة بعملية توسيط على كل طرق الترميز منتقاة بشكل عشوائي ، فلا بد أن واحدة من طرق الترميز هذه تفضي الى هذه النتيجة الجيدة . لقد وصف احد نظريي المعلومات طريقة البرهان هذه بكونها في منتهى الغرابة ، ولعلها كذلك لأنها لن تخطر على بال رياضي غير موهوب ، وربما أن الموضوع برمته ما كان ليخطر على بال رياضي غير موهوب أيضاً .

ان المعالجة السابقة لها صفة العمومية ، لذا فهي تنطبق على كل المسائل إلا أنني أعتقد أن العودة الى مثال القناة الثنائية ذات الاخطاء سيلقي مزيداً من الاضواء على الموضوع ، وقد سبق أن بحثنا هذه القناة في الفصل الحالي وأوضحها الشكل ٨ - ١ . لنر ما يمكن أن نقوله نظرية شانون عن هذا المثال البسيط والشائع .

نفرض أن احتمال ارسال الـ ١ عبر القناة واستقباله . أيضاً هو ح ، وهو نفس احتمال ارسال الـ ١ عبر القناة واستقباله ١ . وهكذا يكون احتمال استقبال الـ ١ بدلاً من الـ ١ المرسل واستقبال الـ ٠ بدلاً من الـ ٠ المرسل هو : ( ١ - ح ) . نفرض أكثر من ذلك أن كل هذه الاحتمالات لا تتوقف على الماضي ولا تتغير مع الوقت . يعطي الشكل ٨ - ٤ التمثيل المجرد لهذه القناة ثنائية متناظرة ( بنفس أسلوب الشكل ٨ - ٢ ) ، وقد غيرنا رمز الحرف المرسل الى ص .



الشكل ٨ - ٤



تتحقق السرعة العظمى لارسال المعلومات عبر هذه القناة ، أي نصل إلى سعتها ، إذا توفر مصدر ارسال يولد الرمز ١ بنفس احتمال توليد الرمز ٠ ، وذلك بسبب تناظر هذه القناة . وهكذا ففي حالة ص ١ وايضاً في حالة ع بسبب التناظر ) :  

$$P = (0) = C = (1) \quad P = (0) = C = (1)$$
  
 ووفق ما تقدم :

$$T (ص) = T (ع) = - (P \log P + C \log C) \quad 1 = \text{بيت لكل رمز}$$

ماذا عن الاحتمالات الشرطية والالتباس في القناة ؟ سنتهم في الانتروبي الشرطية أربعة حدود . المصادر والمساهمات هي :

احتمال استقبال ال ١ هو  $P$  . عندما يتم تلقي ال ١ ، يكون احتمال أن ال ١ هو المرسل مساوياً لـ  $C$  ، واحتمال أن ال ٠ هو المرسل مساوياً لـ  $(1 - C)$  . أن مساهمة هذه الاحداث في الالتباس هي :

$$P [ - C \log C - (1 - C) \log (1 - C) ]$$

إذا أعدنا هذه المناقشة من أجل احتمال استقبال ال ٠ ، نحصل على مساهمة في الالتباس مساوية للمساهمة الاخيرة .

وهكذا فمن أجل القناة الثنائية التناظرة ، يساوي الالتباس مجموع هذه الحدود :  

$$T (ص) = - C \log C - (1 - C) \log (1 - C) \quad C$$
  
 وتكون السعة :  

$$S = 1 + C \log C + (1 - C) \log (1 - C) .$$

نلاحظ أن هذه السعة تساوي الواحد مطروحاً منه التابع الموقع في الشكل ٥ - ١ . إذا كان  $C = P$  ، كانت  $S = 1$  ، وهذا طبيعي لاننا إذا استقبلنا ١ في هذه الحالة ، يتساوى احتمال أن يكون الرقم المرسل ١ مع احتمال أن يكون الرقم المرسل ٠ ، وهكذا لا تساهم الرسالة المستقبلية في حل الرؤية المتعلقة بالرقم المرسل . كما يبدو من العلاقة

الاحيرة أن قيمة السعة هي نفسها من أجل  $C = 0$  ،  $C = 1$  . إذ أن الاستقبال الدائم لـ . في حالة إرسال الـ 1 ، والاستقبال الدائم لـ 1 في حالة إرسال الـ 0 . سيجعل وثوقيتنا من المرسل في هذه الحالة مطابقة لوثوقيتنا به عندما نستقبل وبشكل مستمر الـ 1 لدى إرسال الـ 1 والـ 0 لدى إرسال الـ 0 .

إذا كانت القيمة الوسطية للخطأ مساوية لرقم واحد من أصل كل عشرة ، انخفضت سعة القناة إلى ٥٣ ٪ من قيمتها في حالة الإرسال العاري من الخطأ ، أما إذا كانت القيمة الوسطية ١ ٪ ، انخفضت السعة إلى ٩٢ ٪ .

يعترف الكاتب عند هذه المرحلة أن بساطة النتيجة التي حصلنا عليها في حالة القناة الثنائية المتناظرة لها دور مضلل بالفعل ، فقد كانت مضللة بالنسبة للكاتب على الأقل . فإذا اعتبرنا قناة ثنائية غير متناظرة حيث احتمال استقبال الـ 1 في حالة إرساله هو  $C$  بينما احتمال استقبال الـ 0 في حالة إرساله هو احتمال مغاير  $P$  ، وحاولنا حساب السرعة المثلى عبر القناة ، أي سعة القناة ، لوقعنا في ورطة فعلاً . أما الاقنية الأكثر تعقيداً فتطرح مسائل قد تكون مستحيلة الحل .

هذا هو السبب في الاهتمام الكبير الذي أولي للاقنية الثنائية المتناظرة ، إضافة لأهميتها العملية . ماهو نوع الترميز الذي علينا تبينه كي نحقق إرسالاً عديم الأخطاء عبر هذه القناة . ذكر شانون في بحثه الأول الأمثلة التي طرحها ر. و. هامينغ . نشر مارسيل ج. اي. جولاي عام ١٩٤٩ طرق الترميز المصححة للأخطاء ، بينما نشر هامينغ بحثه عام ١٩٥٠ . يجب أن نذكر أن هذه الأمثلة قد صممت بميد عمل شانون . ويمكن أن تكون قد خطرت لأصحابها قبل ذلك ، إلا أن بحث شانون في الإرسال العاري عن الأخطاء ، شجع العلماء على طرح التساؤل التالي : كيف لنا أن نحقق ذلك .

رأينا ان تحقيق التصحيح الفعال للاخطاء يتم اذا اعتبر المرز سلاسل أطول من ارقام الرسالة . نفرض على سبيل المثال اننا نرمز ارقام رسالتنا في تراكيب مكونة من ١٦ رقم ونضع بعد كل تركيب ارقام ضابطة تمكن من اكتشاف خطأ وحيد سواء اكان في ارقام الرسالة او في الارقام الضابطة . نعتبر كمثال خاص الرسالة المكونة من سلسلة الارقام : ١١٠٠١١٠١٠١٠٠ . لايجاد الارقام الضابطة المناسبة نكتب هذه السلسلة في الجدول الموضح في الشكل ٨ - ٥ .

	١	١	٠	١
١	١	١	٠	١
٠	٠	٠	١	١
٠	٠	١	٠	١
١	١	٠	٠	٠

الشكل ٨ - ٥

نربط بكل سطر او عمود من الجدول دائرة ، ثم نضع في داخل الدائرة . او ١ بحيث يصبح عدد مرات ورود ال ١ في السطر المعتبر او العمود زوجياً . نطلق على هذه الارقام اسم الارقام الضابطة . اذا عددنا عدد مرات ورود ال ١ في كل سطر وكل عمود من مثالنا هذا بعد اضافة الارقام الضابطة ، نحصل على النتائج التالية :

الاعمدة معتبرة من اليمين الى اليسار : ٤ ، ٢ ، ٢ ، ٢  
الاسطر معتبرة من الاسفل الى الاعلى : ٢ ، ٢ ، ٢ ، ٤

ماذا يحدث لو أرسل أحد الأرقام خطأ من أصل الرسالة المكونة من ١٦ رقم . سيصبح عدد مرات ورود الـ ١ فردياً في أحد الأسطر، وأحد الأعمدة ، وهذا يدفعنا لتبديل الرقم في الموقع حيث يتقاطع السطر والعمود المعنيين .

وماذا يحدث لو أن خطأ وقع في أحد الأرقام الضابطة . سيصبح عدد مرات ورود الـ ١ فردياً في أحد الأعمدة . لقد اكتشفنا خطأ في هذه الحالة، إلا أنه لم يكن بين أرقام الرسالة .

ان مجموع الأرقام المرسلة لرسالة مكونة من ١٦ رقم هو  $١٦ + ٨ = ٢٤$  رقم ، وهكذا زاد عدد الأرقام المرسلة بنسبة  $\frac{٢٤}{١٦}$  = ١.٥ لو بدأنا برسالة مكونة من ٤٠٠ رقم لاحتجنا الى ٤٠ رقم ضابط ولكانت نسبة الزيادة في هذه الحالة :  $\frac{٤٤٠}{٤٠٠} = ١.١$  . ولكن بإمكاننا تصحيح خطأ من أصل ٤٤٠ رقم بدلاً من تصحيح خطأ من أصل ٢٤ رقم .

نستطيع تصميم أساليب ترميز أخرى بهدف تصحيح عدد أكبر من الأخطاء في تركيب من الأحرف المرسلة . طبعاً إذا أردنا تصحيح عدد أكبر من الأخطاء لاحتجنا بالمقابل لعدد أكبر من الأرقام الضابطة . نعتبر ترميزاً آخر ، مهما كانت طريقة تصميمه ، يفضي الى تراكيب عددها  $٢^m$  يتكون كل منها من م رقم ثنائي ، وهي تمثل كل التراكيب الممكنة في هذه الحالة والتي نرغب أيضاً بارسالها . سنحتاج في واقع الأمر الى عدد أكبر من الأرقام الثنائية في كل تركيب لتغطية الحاجة من الأرقام الضابطة .

عندما نستقبل تراكيباً معيناً من الأرقام ، يجب أن يكون بمقدورنا ان نستنتج منه أي التراكيب هو الذي أرسل فعلاً ، على الرغم من وقوع بعض الأخطاء فيه وبالعلة ن خطأ ( استبدال عدد من حالات ورود الـ ١ )

ب . ، ، والعكس . يقول الرياضي أن ذلك ممكن إذا كان البعد بين تركيبين متتالين يحتوي على الأقل على عدد من الأرقام الثنائية مساوٍ لـ  $(2 + 1)$  .

لقد استخدم هنا مصطلح البعد بشكل غريب فعلاً ، بهدف تحقيق الغايات التي يسمى الرياضي اليها . نعني بالبعد هنا عدد الأرقام الثنائية في التركيب الأول التي يجب استبدالها كي نحصل على التركيب الثاني . مثلاً البعد بين ٠٠١٠٠ و ١١١١١ هو ٣ ذلك لأننا نحصل على أي من التركيبين باستبدال ٣ أرقام ثنائية في التركيب الآخر .

عندما نرتكب عدداً من الأخطاء في الإرسال مقدارها  $n$  ، يكون البعد بين التركيب الذي نستقبله وذاك الذي أرسل مساوياً لـ  $n$  ، وقد يكون التركيب المستقبل أقرب بـ  $n$  رقم من تركيب آخر . إذا أردنا أن نتأكد من كون التركيب المستقبل أقرب على الدوام من التركيب المرسل منه إلى أي تركيب آخر ، لوجب أن يكون البعد الأصغري بين أي تركيبين من نظام الترميز  $(2 + 1)$  .

نطرح إذن مسألة الترميز وفق تراكيب على النحو التالي : كيف يمكن أن نجد مجموعة من التراكيب عددها  $2^n$  تركيب ، يحتوي كل منها على نفس العدد من الأرقام الثنائية ، وهو عدد يجب أن يكون أكبر من  $m$  ، بحيث يكون البعد الأصغري بين كل تركيبين مساوياً لـ  $(2 + 1)$  . يجب أن يتحقق إضافة لذلك كون التراكيب ذات طول أصغري .

برهنت طريقتا هامينغ وجوالي أنهما فعالتان ، كما أبدعت طرق ترميز فعالة أخرى .

نشير هنا إلى مشكلة أخرى في ترميز التراكيب ، هي وجوب كون الطريقة المعتمدة عملية الطبع خاصة فيما يتعلق بحل الرموز . أن مجرد إدراج الرموز المتنبأة لا يكفي ، فقد تكون اللائحة طويلة جداً . إن استخدام ٢٠ رقم ثنائي للترميز  $(m = 20)$  سينجم عنه جدول يحتوي

بحدود مليون تركيب مختلف من الرموز. يعني هذا أن اكتشاف التركيب الأقرب للتركيب المستقبل سيستغرق وقتاً طويلاً .

تزداد النظرية الجبرية للترميز بوسائل ناجعة للترميز وحل الرموز وتصحيح العديد من الأخطاء . كان سليبيان هو السباق في هذا المجال ، ويمكننا إدراج عدد من أسماء المساهمين . وافق الطرائق التي ابتدعوها : رموز ريد - سولومون ، وأيضاً رموز بوز - شودهوري . أما ألوين برليكامب فقد قدم أساليب رياضية جيدة لحساب التركيب الأقرب للتركيب المستقبل .

تقدم طريقة الترميز الالتفافية واسطة أخرى لتصحيح الأخطاء ، نعتبر وفق هذه الطريقة الجزء الأخير من التركيب الثنائي الذي سيرسل والمكون من م رقم ثنائي ونحفظه في خزان معلومات إضافية . كلما تمت تفدية رقم ثنائي جديد ، يرسل المرمز ٢ أو ٣ أو ٤ أرقام ثنائية ، وهذه الأرقام المرسله تنتج عن جمع الأرقام الثنائية في خزان المعلومات الإضافي ولكن بدون حمل من خانة لأخرى .

تعود هذه الطريقة أصلاً الى الياس ، إلا أن البحث الأول الذي نشر حول موضوع الترميز وحل الرموز أتى عام ١٩٥٨ من خلال تسجيل براءة اختراع لـ د. و. هاجيلبارجر . أما الاستخدام الأول للطريقة فقد بدأ عام ١٩٦٧ على يد أندريه ج. فيتربي الذي اخترع طريقة مثلى وبسيطة لحل الرموز دعيت باسم حل الرموز بأعظم احتمال ممكن .

تستخدم هذه الطريقة اليوم في الأقنية ذات الضجيج الهامة كإرسال الصور من مركبة فويجير عن المشتري وأتباعه . إن أهمية الطريقة تتجسد باستخدامها شدة وإشارة النبضة المستقبلية .

إذا استقبلنا نبضة موجبة صغيرة فكاننا استقبلنا نبضة سالبة مع ضجيج ولا يعقل أن تكون نبضة موجبة مع ضجيج . أما إذا استقبلنا نبضة موجبة كبيرة فالأرجح أنها نبضة موجبة مع ضجيج وليست نبضة سالبة مع ضجيج . تستخدم الطريقة المشار إليها هذه الملاحظات .

يستخدم الترميز في تراكيب بهدف حماية المعلومات ذات الأهمية المخزنة في الكمبيوتر . ويستخدم أيضاً في إرسال المعلومات عبر الأقنية ذات الضجيج المخفض .

تعرض معظم الدارات المستخدمة لنقل المعلومات الى اندفاعات طويلة من الضجيج . عندما يحدث ذلك ، تكون الطريقة المثلى في تصحيح الخطأ هي تقسيم الرسالة الى تراكيب من الأرقام واستخدام طريقة بسيطة لاكتشاف الخطأ . اذا اكتشف الخطأ في التركيب المستقبل ، يصبح عندها من المفضل إعادة إرسال التركيب .

يجد الرياضيون في طريقة الترميز بالتراكيب متعة وتحدياً في وقت واحد. لذا أصبحت نظرية المعلومات وفق بعضهم نظرية جبرية للترميز. ان نظرية الترميز غاية في الأهمية لنظرية المعلومات . لقد كانت نظرية المعلومات في بدايتها ، أي عند طرح عمل شانون ، أكثر شمولاً . يجب ان نعتبر ترميز المصدر وكذلك ترميز القناة في إطار موضوع الترميز .

بحسبنا في الفصل السابع طرق التخلص من الغزارة بحيث يمكن بث الرسالة بعدد أقل من الأرقام . أما في هذا الفصل فقد رأينا كيفية إضافة سمة الغزارة الى رسالة تفتقر إليها بهدف تحقيق إرسال افتراضي خالٍ من الأخطاء عبر قناة ذات ضجيج . لقد أذهلت الرياضيين والمهندسين فكرة ان مثل هذا التحقيق ممكن ، أما شانون فقد برهن الفكرة واثبت أنها قابلة التحقيق فعلاً .

سيكون المستقبل في ريبة ، قبل استلامه الرسالة الموثوقة عبر قناة خالية من الأخطاء ، عن الرسالة المعينة من مجموعة الرسائل الممكنة التي سيقوم المصدر بإرسالها فعلاً . ان قيمة هذه الريبة هي سرعة إصدار المعلومات من المصدر أو الانتروبي الخاصة به مقاسة بالبيت لكل رمز ولكل نانية . ستحل ريبة المستقبل هذه تماماً إذا تلقى نسخة مطابقة للرسالة التي بثت .

يمكن بث الرسالة بنبضات كهربائية سالبة وموجبة . إذا أضيف إلى الرسالة ضجيج مؤلف من نبضات عشوائية سالبة وموجبة ، فيمكن أن تنقلب النبضات الموجبة سالبة والسالبة موجبة . إذا استخدمت مثل هذه القناة للبث فعلاً ، فسيكون هنا ريبة ما فيما يتعلق بالإشارة التي سيتلقاها المستقبل عند إرسال المصدر إشارة معينة .

عندما يتلقى المستقبل رسالة معينة عبر قناة ذات ضجيج ، فسيكون بالطبع على علم أكيد بما وصله ، إلا أنه لن يستطيع التأكد بشكل كامل عن الرسالة التي صدرت فعلاً من الجانب الآخر ، أي المرسل . وهكذا فلن تحل الريبة عنده حتى لدى وصول الرسالة إليه . تعتمد الريبة المتبقية على احتمال أن تكون الإشارة المستقبلية مخالفة للإشارة الصادرة .

إن ريبة المستقبل حول الرسالة الفعلية ، هي من وجهة نظر المرسل مجموع انتروبي أو ريبة مصدر الرسائل وريبة المستقبل حول الرسالة الصادرة عند علمه الأكيد بالرسالة المستقبلية . يستخدم شانون كمعيار لهذه الريبة الأخيرة ما يسميه الالتباس في القناة ، ويعرف سرعة إرسال المعلومات كحاصل طرح هذا الالتباس من انتروبي الرسالة .

تعتمد سرعة إرسال المعلومات على كمية الضجيج أو الريبة في القناة ، وعلى طبيعة المصدر المرسل . نفترض أننا اخترنا مصدر للإرسال يؤمن لنا قيمة عظمى بسرعة الإرسال ، نصلح في هذه الحالة على تسمية القيمة العظمى المحققة بسرعة القناة ذات الضجيج ونقيسها بالبيت لكل رمز أو البيت لكل ثانية .

إن مفهوم سعة القناة حتى الآن قد انحصر في كونه كمية رياضية معرفة يمكن حسابها إذا عرفنا احتمالات الأنواع المختلفة للأخطاء والممكنة في بث الرسائل . إلا أن هذا المفهوم ، أي مفهوم سعة القناة ، هو مفهوم هام للغاية ، لأن شانون يبرهن ، من خلال نظريته الأساسية عن الإقنية ذات الضجيج ، أنه إذا كانت انتروبي المصدر أقل من سعة القناة ، فيمكن ترميز الرسائل التي يولدها المصدر بحيث يمكن بثها عبر القناة ذات الضجيج بخطأ صغير لا يتجاوز حداً معروفاً بشكل مسبق .



ان تحقيق بث الرسائل بدون اخطاء عبر اقنية ذات ضجيج ، يتطلب جميع سلاسل كبيرة من الرموز ومزجها في رموز أكبر . هذا هو بالضبط ترميز التراكيب الذي واجهناه سابقاً ، إلا أننا نرجع اليه لهدف آخر . فهنا لا نستخدمه للتخلص من غزارة الرسائل التي يسببها المصدر ، بل على العكس للزيادة في الغزارة بحيث نتمكن من بث الرسائل عبر الاقنية ذات الضجيج وبدون خطأ . ان جوهر مشكلة الاتصالات الفعالة والخالية من الاخطاء هو في واقع الامر ، كيفية تخليص الرسائل من الغزارة غير الفعالة الموجودة فيها وازافة عوضاً عنها غزارة من نوع ملائم تمكن من اكتشاف وتصحيح اخطاء الإرسال .

ان الأرقام المضافة لهذه الغاية ستبطل من سرعة الارسال . لقد رأينا ان استخدام قناة ثنائية متناظرة يصل الى المستقبل عبرها رقم واحد غير صحيح من اصل ١٠٠ رقم مرسل ، يقيد نسبة بث الرسائل عبرها بقيمة ٩٢٪ . يعني ذلك وسطياً ، أن اعتبارنا لرسالة مؤلفة من ٩٢ رقم وخالية من الغزارة ، يفرض علينا أن نضمنها ٨ أرقام إضافية ضابطة جاعلين بذلك مجمل وفق الأرقام غزيراً .

يلعب عمل شانون بالنسبة اليها دور المرشد ، إلا أن الصعوبات الرياضية التي تواجهنا عند التعامل مع الاقنية المعقدة هي صعوبات جمة للغاية ، وحتى في حالة القناة الثنائية البسيطة المتناظرة والتي تعتمد القطع والواصل ، فإن مشكلة البحث عن الترميز الفعال هي مشكلة كبيرة جداً ، لهذا على الرغم من أن الرياضيين قد أبدعوا عدداً كبيراً من طرق الترميز الممتازة ، ولكن يا للأسف تبقى هذه الطرق بدورها صعبة التطبيق العملي .

هل يعني ذلك أننا نقدم صورة مشجعة ؟ اكم نحن اليوم أكثر حكمة بالمقارنة مع الفترة السابقة لنظرية المعلومات ، إذ أننا نعرف ما هي المشكلة ، ونعرف من حيث المبدأ ما الذي يجب علينا عمله ، وقد أدهشت النتائج المهندسين والرياضيين . وأكثر من ذلك فبحوثنا طرائق فعالة للترميز ومصححة للأخطاء في نفس الوقت يمكن تطبيقها في مجالات متعددة أهمها بث صورة الكواكب الى الأرض من مركبات الفضاء البعيدة .



## الفصل التاسع

### حرة أبعاد

عشرت منذ سنين بعيدة ( حوالي ثلاثين سنة ) في مكتبة سانت بول العامة على كتاب أطلعني على غوامض البعد الرابع . كان عنوان الكتاب الأرض المسطحة لمؤلفه آيوت ، وقد تناول بالوصف عالماً ذي بعدين عديم السماكة . يمكن رسم هذا العالم وكل كائناته بكل تفاصيلها على صفحة من الورق .

لا أزال أتذكر بعجب حتى الآن خصائص المجتمع في الأرض المسطحة ، فالكائنات هناك مضلعة ، وعدد الأضلاع يشير الى الوضع الاجتماعي . تمنح أكثر الكائنات رفعة من بين الكائنات المتعددة الأضلاع مرتبة الدائرة . أما أقل الكائنات أهمية فهي المثلثات المتساوية الساقين ، أما المتساوية الأضلاع فهي أرفع بدرجة لأن الانتظام مطلوب ومحترم . وكانت ، في الواقع ، الأطفال غير المنتظمة تكسر ويعاد تشكيلها بانتظام ، وكانت هذه العملية في كثير من الأحيان مهلكة . أما الاناث في ذلك المجتمع فكانوا شديدي النحافة واشبه بكائنات إبرية ، وقد انتزعن الإعجاب بمشيتهن المتمايلة . أما المربع فيتلاءم مع كل ما نبغي من ربط الأرض المسطحة به .

وللأرض المسطحة أخلاقياتها الرياضية أيضا . يندعش بطل الرواية عندما تظهر في عالمه فجأة دائرة متغيرة المساحة ، فالدائرة هذه هي تقاطع كائن ثلاثي الأبعاد وهو الكرة مع الأرض المسطحة . تشرح الكرة أسرار

عالم الأبعاد الثلاثة للمربع الذي يبدأ بدوره القاء المواظع عن المذهب الغريب . يترك الكتاب قارئه وقد سيطر عليه شعور بإمكانية أن يواجه هو نفسه في أحد الأيام كائناً متموجاً متخفياً ، هو في واقع الأمر تقاطع كائن رباعي الأبعاد مع عالمنا الثلاثي الأبعاد .

تشكل المكعبات الرباعية الأبعاد وما يعاثلها من كرات وأشكال هندسية أخرى مادة تقليدية لأبحاث الرياضيين وكتابات مؤلفي الخيال العلمي . لتنتخيل عالماً رباعي الأبعاد يشبه عالمنا الثلاثي الأبعاد ويضم بين ثنياته عوالم كثيرة ثلاثية ، قريبة من بعضها كما صفحات المخطوطة ، إلا أنها منفصلة ومختلفة بتشكيلاتها عن بعضها . ونبعد في خيالنا أكثر بتصورنا إمكانية الانتقال من أحد هذه العوالم إلى عالم آخر عبر العالم الرباعي الأبعاد المحيط ، فنصل مثلاً إلى أحشاء مريض لاستئصال زائده الدودية .

لقد سمع الكثيرون منا أن أينشتاين قد استخدم الزمن كبعد رابع ، كما سمع البعض عن فراغات الأطوار المتعددة الأبعاد في الفيزياء حيث تعتبر المركبات الثلاثة للموقع والمركبات الثلاثة للسرعة جميعها بمثابة إحداثيات في عالم سدا سي الأبعاد .

تختلف هذه المفاهيم ، على كل حال ، عن الفكرة الكلاسيكية للبعد الرابع والذي يشبه تماماً الأبعاد المألوفة للمكان التي نعيشها ونعرفها جيداً وهي أبعاد فوق وتحت ، يمين ويسار ، أمام وخلف . ترجع القضية إلى رياضيي القرن التاسع عشر الذين نجحوا بتعميم الهندسة بحيث تتضمن عدة أبعاد بل ولا نهاية من الأبعاد .

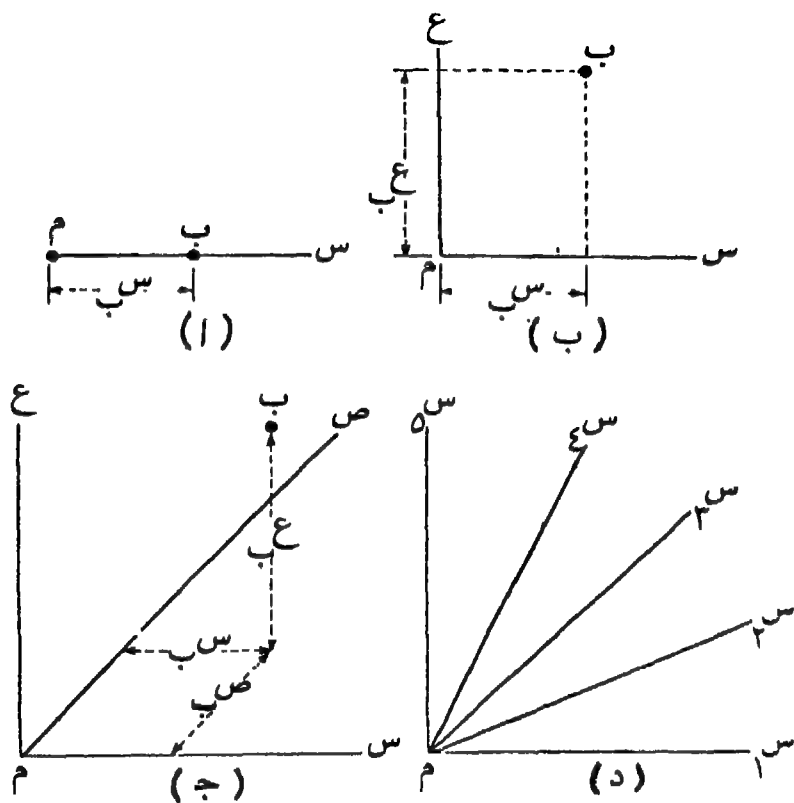
يقف الرياضي من هذه الأبعاد على أنها مجرد تشكيلات عقلية . يبدأ بخط يده اتجاه س أو محور السينات ، كما يوضح الشكل ٩ - ١ . تقع نقطة ما - ب - على يمين مبدأ الإحداثيات م على محور السينات . يحدد الإحداثي س ب في الحقيقة موقع النقطة ب .

يضيف الرياضي بعد ذلك خطاً آخر عمودياً على محور السينات هو محور العينات م ع ويستطيع تحديد موقع النقطة ب في عالم البعدين أو المستوي حيث يقع هذان المحوران باستخدام عددين أو إحداثيين : البعد عن النقطة م باتجاه المحور م ع ، أي الارتفاع ع ب ، والبعد من النقطة م باتجاه المحور م س ، أي البعد الأفقي للنقطة ب .

يوضح الشكل ٩ - ١ أيضاً حالة ثلاثة محاور من المفروض أن تكون متعامدة مع بعضها مثنى مثنى ، كما في حالة أحرف المكعب . تمثل هذه المحاور الفراغ الثلاثي الأبعاد الذي نعيش ضمنه ، ويتحدد موقع نقطة ب بإحداثياتها الثلاثة س ب ، ص ب ، ع ب .

طبعاً المحاور الثلاثة كما هي واردة في الشكل غير متعامدة مع بعضها . فما نملكه هنا هو إسقاط منظوري من عالم الأبعاد الثلاثي إلى عالم البعدين لمحاور ثلاثة هي في واقعها ضمن العالم الثلاثي الأبعاد متعامدة . يقدم لنا القسم الأخير من الشكل ٩ - ١ مسقطاً على عالم البعدين لمحاور الإحداثيات في العالم الخماسي الأبعاد . وقد غيرنا هنا المصطلحات قليلاً ، إذ أن ارتقائنا في العوالم المتعددة الأبعاد سيستنفذ الأحرف الأبجدية بسرعة ، وهكذا عوضاً عن الإشارة إلى الإحداثيات بالأحرف س ، ع ، ص ، أشرنا إليها بالرموز : س ١ ، س ٢ ، س ٣ ، س ٤ ، س ٥ ، تماماً كما يفعل الرياضيون .

مرة أخرى المحاور الخمسة ليست متعامدة في الشكل كما هي الحال في حالة المحاور الثلاثة ، كما أننا لا نستطيع رسم خمسة محاور متعامدة مثنى مثنى في فراغنا الثلاثي الأبعاد ، إلا أن الرياضي يستطيع التعامل مع مثل هذه المحاور المتعامدة بشكل عقلي ومنطقي . ويستطيع كذلك جرد الصفات المختلفة للأشكال الهندسية في الفراغ الخماسي الأبعاد حيث تحدد النقطة بإحداثياتها الخمسة :



الشكل ٩ - ١

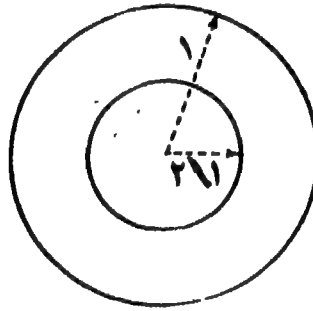
س<sup>١</sup> ا ب ، س<sup>٢</sup> ب ، س<sup>٣</sup> ب ، س<sup>٤</sup> ب ، س<sup>٥</sup> ب . وإكمال المشابهة مع الفراغ العادي ( الفراغ الإقليدي ) يقول الرياضي أن مربع بعد النقطة ب عن مبدأ الاحداثيات م يعطي بالعلاقة :

$$م ب^2 = د = س ا ب^2 + س ب^2 + س ب^2 + س ب^2 + س ب^2$$

يعرف الرياضيون حجم المكعب في الفراغ المتعدد الأبعاد على أنه جلاء اضلاعه . وهكذا ففي الفراغ ذي البعدين ، المكعب المعني هو المربع ،

وحجمه في هذه الحالة هو مساحة المربع وتساوي لـ ٢ ، حيث ل هو ضلع المربع ، يصبح هذا الرقم لـ ٢ في الفراغ الثلاثي الأبعاد ، حيث ل هو ضلع المكعب المألوف . وفي حالة الفراغ الخماسي الأبعاد يعطي حجم المكعب ذي الضلع ل بالقيمة له ، وفي الفراغ ذي ٩٩ بعد يكون حجم المكعب بالمقابل : ل ٩٩ .

تتسم خصائص بعض الأشكال في الفراغات المتعددة الأبعاد بكونها سهلة إذا أردنا فهمها ، ومدهشة إذا أردنا اعتبارها . نعتبر على سبيل المثال الحلقة المبينة في الشكل ٩ - ٢ والمولدة من دائرتين متمركزتين نصفى قطريهما :  $\frac{1}{2}$  ، ١ .



الشكل ٩ - ٢

ان مساحة الدائرة ( الحجم في عالم البعدين ) هي  $\pi \times 2$  ، حيث ر هو نصف قطرها ، وبذلك تكون مساحة الدائرة الكبيرة  $\pi$  ومساحة الصغيرة  $\frac{\pi}{4}$  ، وهكذا يقع ربع المساحة الكلية داخل الدائرة الصغيرة .

نفرض ان الشكل ٩ - ٢ يمثل كرات ، يساوي حجم الكرة  $\frac{4}{3}$

III ر ٢ وهكذا يقع  $\frac{1}{8}$  الحجم الكلي للكرة داخل الكرة الصغيرة التي نصف قطرها  $\frac{1}{2}$  . نعم ما تقدم بقولنا ، إن حجم الكرة في الفراغ ذي البعدن يتناسب مع  $r^n$  ، لذلك فإذا اعتبرنا كرة في هذا الفراغ نصف قطرها ١ ، فإن الجزء من حجمها الواقع داخل كرة متمركزة معها ونصف قطرها  $\frac{1}{4}$  ، هذا الجزء من الحجم يساوي  $\frac{1}{64}$  ، وهكذا إذا كنا في عالم سلمي الأبعاد أي إذا كانت  $n = 7$  ، فإن هذا الجزء يساوي  $\frac{1}{128}$  .

نستطيع أن نعم باتجاه آخر حيث نعتبر جزء الكرة ذات قطر  $r$  المحتوى في كرة متمركزة معها نصف قطرها ٩٩.٩. ر . نجد في حالة فراغ ذي ١٠٠٠ بعد أن هذا الجزء من الحجم هو ٤.٠٠٠. ر . فقط . وهكذا نحن الآن إزاء النتيجة التي لا مفر منها ، ألا وهي أنه في حالة كرة مغمورة في فراغ متعدد الأبعاد وعدد أبعاده كبير للغاية فإن كل الحجم تقريباً يقع بقرب السطح .

أولست كل هذه الأفكار مجرد رياضيات بحثة ملائمة للنخبة فقط . نعم سيبقى هذا هو طابع هذه الأفكار إلى أن نربطها بمسائل العالم الفيزيائي . كان للأعداد التخيلية مثل  $\sqrt{-1}$  نفس الوضع في يوم من الأيام ، إذ لم يكن لها أي قيمة فيزيائية ، ثم ما لبثت أن تسربت إلى العالم الواقعي فأصبح لها معانٍ فيزيائية وأخرى هندسية كهربائية . هل نتمكن من إيجاد حالة فيزيائية تنطبق عليها خصائص الهندسات المتعددة الأبعاد . نعم يمكننا ذلك ، وخاصة في نظرية الاتصالات . لقد استخدم شانون الهندسة المتعددة الأبعاد لبرهان نظرية هامة تتعلق بإرسال الإشارات المستمرة ذات الحزم المحددة وبوجود الضجيج .

يقدم لنا عمل شانون مثالا رائعا عن استخدام وجهة نظر جديدة واستثمار نتائج فرع من الرياضيات لم يأخذ طريقه إلى التطبيق بعد (في هذه الحالة الهندسة المتعددة الأبعاد) وذلك لحل مشكلة ذات أهمية



عملية كبيرة . اقترح أن نخرج على جانب واسع من محاكمات شانون ، لأنها كما اعتقد تشكل مثالا ممتازاً عن الرياضيات التطبيقية . إن تفاصيل هذه المعالجات الرياضية هي غير مالوفة أكثر من كونها صعبة ، وعلى القارئ أن يركب متنها على حسابه الخاص .

يجب أن نتبنى معياراً عاماً لشدة الإشارة والضجيج وذلك لتحقيق تناول أمثل لمسألة ارسال الإشارات المستمرة بوجود الضجيج . تثبت الطاقة أنها المعيار المناسب والمفيد في هذا العرض .

عندما نبذل قوة مقدارها ١ كغ لمسافة ١ متر لرفع ثقل مقداره ١ كغ لارتفاع ١ متر نقول أننا قمنا بعمل متساوي قيمته ١ كيلو غرامتر ويصبح لدى الوزن بسبب الارتفاع قدرة تساوي ١ كيلو غرامتر . يمكن لهذا الوزن في حالة سقوطه أن يقدم عملاً مكافئاً لقدرة يستخدم مثلاً لإدارة جهاز ما .

تعرف الطاقة بأنها سرعة تقديم العمل . فإذا قدمت آلة ما عملاً مقداره ٦٠ كيلو غرامتر في الدقيقة ، كانت طاقتها ١ كيلو غرامتر في الثانية .

تستخدم الفيزياء وحدات معتمدة للقدرة والطاقة ، فوحدة القدرة هي جول ، ووحدة الطاقة هي واط ، ويساوي الواط جول واحد في الثانية .

إذا ضاعفنا الكمون الكهربائي لإشارة ، نزيد إذ ذاك قدرتها وطاقاتها بأربعة مرات ، لأن الطاقة والقدرة كلاهما تتناسب مع مربع ذلك الكمون .

رأينا في الفصل الرابع أنه يمكننا تمثيل الإشارة المستمرة بشكل كامل بعدد من العينات مساوٍ لـ ٢ س في كل ثانية إذا كان عرض جزمها س . وبالعكس يمكننا بناء إشارة مستمرة ذات جزم محدود تمر من ٢ س نقطة ممثلة لنفس العدد من العينات التي نختارها في كل ثانية .

نستطيع تحديد وتغيير كل عينة بشكل اختياري دون تغيير باقي العينات ،  
ويترتب على ذلك تغيير الإشارة المحدودة الحزام .

نقيس ساعات العينات بالفولط ، وتمثل كل عينة قدرة متناسبة مع  
مربع هذه السعة .

وهكذا نستطيع التعبير عن مربعات ساعات العينات بدلالة القدرة .  
نقبل بأن القدرة تساوي مربع سعة العينة إذا تبيننا وحدات خاصة  
لقياس القدرة ، إن ذلك لن يسبب لنا أي متاعب إضافية .

نصطلح على تسمية ساعات العينات المتتالية والمنتقاة بشكل صحيح  
من إشارة محدودة الحزمة والمقاسة ربما بالفولط ، بالتسميات :  
س<sub>١</sub> ، س<sub>٢</sub> ، س<sub>٣</sub> ، ..... الخ ، وستمثل القدرات المقابلة تبعاً لذلك  
بالرموز : س<sub>١</sub><sup>٢</sup> ، س<sub>٢</sub><sup>٢</sup> ، س<sub>٣</sub><sup>٢</sup> ، ..... الخ . أما القدرة الكلية للإشارة  
والتي نرمز لها بالرمز ق ، فتساوي مجموع قدرات العينات أي :

$$ق = س_١^٢ + س_٢^٢ + س_٣^٢ + \dots$$

نلاحظ أنه من وجهة نظر الهندسة المتعددة الأبعاد ، تساوي القدرة  
ق مربع بعد نقطة عن مركز الاحداثيات ، إذا كانت احداثيات هذه النقطة  
هي س<sub>١</sub> ، س<sub>٢</sub> ، س<sub>٣</sub> ، ..... الخ .

وهكذا إذا مثلنا ساعات العينات من إشارة محدودة الحزام بإحداثيات  
نقطة في فراغ متعدد الأبعاد ، كانت النقطة ذاتها ممثلة للإشارة الكاملة أي  
كل العينات مأخوذة دفعة واحدة ، كما يمثل مربع بعد النقطة عن مبدأ  
الإحداثيات قدرة الإشارة الكاملة .

لذا ينبغي علينا تمثيل الإشارة بهذه الطريقة الهندسية ؟ السبب  
هو أن شانون فعل ذلك لبرهان نظرية هامة في نظرية الاتصالات تتعلق  
بتأثير الضجيج على إرسال الإشارات .

نستذكر النموذج الرياضي لمصدر الاشارات الذي تبيناه في الفصل الثالث عند محاولتنا البحث من طريقة لتحقيق هذا الهدف . فقد فرضنا عندئذ ان المصدر ساكن ومستقر ، وما علينا هنا الا ان نسحب هذا الفرض على الضجيج المعبر وعلى جملة الاشارة والضجيج .

انه ليس امراً مستحيلاً من حيث المبدأ ان مصدراً كهذا سينتج الاشارة او الضجيج وفق تتالٍ مديد من عينات عالية القدرة جداً او منخفضة القدرة جداً ، وليست الاستحالة هنا بأكثر من استحالة توليد مصدر مستقر لسلاسل أحرف أبجدية يتواتر فيها الحرف E بكثرة . الواقع ان الامر هذا قليل الاحتمال وحسب . نتعامل هنا مع النظرية التي واجهناها لأول مرة في الفصل الخامس . يولد المصدر المستقر صنفاً محتملاً من الرسائل وصنفاً غير محتمل اطلاقاً لدرجة اننا نتمكن من اهماله . تنطبق حالة الرسائل غير المحتملة عندما تكون الطاقة الوسطية للعينات المنتجة بعيدة جداً عن المتوسط الزمني ( ومتوسط المجموعة ) المميز للمصدر المستقر .

وهكذا فهناك طاقة متوسطة ذات معنى للاشارة في حالة كل الرسائل الطويلة التي علينا اعتبارها ، وهذه الطاقة المتوسطة غير متغيرة مع الوقت ونستطيع تحديدها باضافة القدرات لعدد كبير من العينات المتتالية ثم قسمة المجموع على الفترة الزمنية التي بشت خلالها هذه العينات . عندما نجعل هذه الفترة أكبر وأكبر وعدد العينات أكثر وأكثر ، نقرب من القيمة المتوسطة الصحيحة بشكل مطرد . ان الطاقة المتوسطة التي نحصل عليها بهذا الشكل ستكون هي نفسها بصرف النظر عن المجموعة المتتالية من العينات التي نعتبرها .

نستطيع اعادة صياغة ما تقدم في جمل مختلفة . لا يتغير مجموع قدرات عدد كبير من العينات المتتالية المنتجة من قبل مصدر مستقر الا في حدود طفيفة ومهملة ويبقى ثابتاً بصرف النظر عن المجموعة المعينة من العينات المتتالية التي نعتبرها . ان هذا ينطبق على كل الحالات تقريباً باستثناء حالات نادرة بعيدة الاحتمال جداً .

تمكننا حقيقة كون المصدر من النوع المستقر من قول المزيد . ان قدرة نفس العدد الكبير من العينات المتتالية ستكون من وجهة النظر العملية هي نفسها ، بصرف النظر عن الاشارة المعنية التي يولدها المصدر ، كما تنخفض الفروق بين القدرات بازدياد عدد العينات .

نمثل الاشارات المتولدة عن مصدر بنقاط في الفراغ المتعدد الأبعاد . نستعير من الاشارة التي عرض حزامها س ومدتها ز بعدد من العينات مساو لـ ٢ س ز ، ونعتبر سعة كل عينة مقابلة لواحد من احداثيات هذا الفراغ . اذا كانت القيمة المتوسطة لقدرة كل عينة هي ق ، كانت قدرة كل العينات هي ٢ س ز ق اذا كان العدد س ز كبيراً بما فيه الكفاية . رأينا ان القدرة الكلية تمثل بعد النقطة الممثلة للاشارة عن مبدأ الاحداثيات وهكذا عندما يزداد عدد العينات يكبر بالمقابل وبشكل تدريجي الحيز الذي تقع ضمنه النقاط الممثلة للاشارة المختلفة ذات المدد المتساوية والمنتجة من قبل المصدر ، أي تقترب تلك النقاط من سطح الكرة الكبيرة ذات نصف القطر :  $\sqrt{2} س ز ق$  ان وقوع هذه النقاط بقرب السطح لا يبدو غريباً اذا تذكرنا أنه من أجل جسم متعدد الأبعاد يقع الحجم تقريباً بأكمله قرب السطح .

لا نستقبل الاشارة نفسها ، بل نستقبلها مضافاً اليها الضجيج . يطلق على الضجيج الذي يعتبره شانون اسم ضجيج غاوس الابيض . تعكس كلمة الابيض حقيقة احتواء الضجيج على كل التواترات على قدم المساواة ، ونفرض ان الضجيج يحتوي على التواترات حتى حد اعلى ( س ) ه ف ث ولا يحتوي تواتر اكبر من هذا الحد . اما كلمة غاوس فتشير الى قانون احتمال عينات ذات ساعات مختلفة ، وهو قانون يصلح لعدة مصادر طبيعية للضجيج . تعتبر كل عينة من أصل هذا الضجيج الغاوسي ذي الـ ٢ س عينة الممثلة له ، غير مرتبطة بسواها ومستقلة عنه . اذا عرفنا القدرة المتوسطة للعينات والتي ترمز لها ن ، فإن معرفة قدرات بعض العينات لا يسمح بمعرفة قدرات العينات الاخرى . ستكون في هذه

الحالة القدرة الكلية لعدد من العينات يساوي  $2$  س ز هي  $2$  س ز ن اذا كان العدد  $2$  س ز كبيراً وستكون القدرة هي نفسها تقريباً لاي متتالية من عينات الضجيج تضاف الى عينات الاشارة .

راينا ان متتالية معينة من عينات الاشارة يمكن تمثيلها بنقطة في الفراغ المتعدد الابعاد تبعد  $\sqrt{2}$  س ز ق عن مبدأ الاحداثيات . اما النقطة المقابلة لمجموع الاشارة والضجيج فتتمثل بنقطة ابعد قليلاً عن تلك الممثلة للاشارة . نرى في الواقع أن البعد بين النقطة الممثلة للاشارة والنقطة الممثلة لمجموع الاشارة والضجيج هو  $\sqrt{2}$  س ز ن وهكذا تقع النقطة الممثلة لمجموع الاشارة والضجيج في كرة صغيرة متعددة الابعاد مركزها النقطة الممثلة للاشارة ونصف قطرها  $\sqrt{2}$  س ز ن .

اننا لا نتلقى الاشارة فقط ، فنحن نتلقى اشارة قدرتها الوسطية ق لكل عينة مع ضجيج غاوسي قدرته الوسطية ن لكل عينة . وتكون القدرة الكلية المستقبلية خلال فترة زمنية مقدارها ز :  $2$  س ز ( ق + ن ) وتقع النقطة الممثلة لمجموع الضجيج والاشارة في كرة متعددة الابعاد نصف قطرها  $\sqrt{2}$  س ز ( ق + ن ) .

بعد استقبالنا للاشارة والضجيج خلال ز ثانية نستطيع ايجاد النقطة الممثلة للاشارة والضجيج . ولكن كيف نستطيع ترشيح الاشارة والحصول عليها على حدة ، كل ما نعلمه أن الاشارة تقع على بعد  $\sqrt{2}$  س ز ن من النقطة الممثلة لمجموع الاشارة والضجيج .

كيف نتأكد من استنتاج اي الاشارات هي التي ارسلت ؟ نفرض أننا نضع داخل الكرة متعددة الابعاد ذات نصف القطر  $\sqrt{2}$  س ز ( ق + ن ) عدداً كبيراً من كرات صغيرة متعددة الابعاد وغير متداخلة مع بعضها وذات انصاف اقطار أكبر بقليل من  $\sqrt{2}$  س ز ن . نكتفي بعد ذلك بإرسال الاشارات الممثلة بمراكز هذه الكرات الصغيرة .

عندما نستقبل عدداً من العينات ٢ س ز من أي من هذه الاشارات مضافا اليها عينات الضجيج ، فان النقطة المقابلة في الفراغ المتعدد الابعاد ستقع داخل الكرة المتعددة الابعاد الصغيرة المعنية المحيطة بالنقطة المثلة للاشارة المعتبرة وليس ضمن أي كرة أخرى . وسبب ذلك ، انه كما رأينا في حالة سلاسل العينات الطويلة المنتجة من قبل مصدر ضجيج مستقر ، تقع النقطة المثلة لهذه العينات تقريباً على سطح كرة نصف قطرها  $\sqrt{2} \text{ س ز ن}$  . وهكذا يمكن تمييز الاشارة المرسله ودون خطأ رغم الضجيج .

ما هو عدد الكرات المتعددة الابعاد وغير المتداخلة ذات انصاف الاقطار  $\sqrt{2} \text{ س ز ن}$  التي يمكن وضعها داخل كرة نصف قطرها :  $\sqrt{2} \text{ س ز ( ن + ق )}$  . ان هذا العدد لا يمكن أن يتجاوز بحال من الاجوال نسبة حجم الكرة الكبيرة الى احدى الكرات الصغيرة .

تحدد ابعاد الفراغ المعتبر بعدد عينات الاشارة والضجيج ٢ س ز . يتناسب حجم كرة في فراغ متعدد الابعاد مع  $\text{ر}^{\text{ن}}$  ، حيث  $\text{ر}$  هو نصف قطر الكرة و  $\text{ن}$  ابعاد الفراغ . وهكذا تكون نسبة الكرتين المذكورتين :

$$\left( \frac{\text{ق} + \text{ن}}{\text{ن}} \right)^{\text{س ز}} = \left( \frac{\sqrt{2} \text{ س ز ( ن + ق )}}{\sqrt{2} \text{ س ز ن}} \right)^{\text{س ز}}$$

يشكل هذا العدد حداً لعدد الرسائل المختلفة التي يمكن أن نبثها خلال الفترة الزمنية ز . اما لو غاريتم هذا العدد فهو عدد واحداث البيت التي يمكن أن نرسلها ،

$$\text{س ز ل ع} \left( \frac{\text{ق} + \text{ن}}{\text{ن}} \right)^{\text{س ز}}$$

يساوي بالتالي عدد واخداث البيت في كل ثانية

$$ص = س ( ١ + \frac{ق}{ن} )$$

يتيح لنا وصولنا الى هذه المرحلة ، ملاحظة ان نسبة متوسط القدرة لكل عينة من الاشارة الى متوسط القدرة لكل عينة من الضجيج يجب ان تساوي نسبة الطاقة الوسطية للاشارة الى الطاقة الوسطية للضجيج ، وهذه النسبة الاخيرة تساوي النسبة  $\frac{ق}{ن}$  الواردة في العلاقة الاخيرة .

بينت المناقشة السابقة انه لا يمكن ارسال اكثر من ص بيت في كل ثانية في حالة حزام عرضه ( س ) ه ف ث وباستخدام اشارة طاقتها ق ممزوجة بضجيج طاقته ن . ذهب شاتون ابعد من ذلك مستخدماً حقيقة ان حجم الكرة المتعددة الابعاد محتوى باكملة تقريباً قرب السطح ومبينا بالتالي ان سرعة اصدار الاشارات تقترب من القيمة ص في العلاقة السابقة بقدر ما نريد وبعدد صغير من الاخطاء وفق ما نرغب . وهكذا فالقيمة ص في العلاقة الاخيرة هي سعة القناة في حالة قناة مستمرة اضيف ضجيج غاوسي الى الاشارة عبرها .

سنعمد الى مقارنة العلاقة الاخيرة مع علاقات سرعة الارسال والمعلومات التي اقترحها نيكويست وهارثلي عام ١٩٢٨ والتي شرحناها في الفصل الثاني . يذهب نيكويست وهارثلي الى ان عدد الارقام الثنائية التي يمكن ارسالها في كل ثانية هو : ل لع م ، حيث م هو عدد الرموز المختلفة ، ول هو عدد الرموز المرسل في كل ثانية .

ان احد انواع الرموز التي يمكننا ان نعتبرها هو قيم معينة للكمون الكهربائي :  $٣ + ، ١ - ، ١ - ، ٣ -$  . لقد كان نيكويست على علم ، مثلنا نحن الآن ، بان عدد العينات المستقلة أو قيم الكمون التي يمكن

ارسالها في كل ثانية هو ٢ س ، باستخدام هذه الحقيقة يمكننا اعادة كتابة العلاقة الاخيرة على الشكل :

$$ص = \frac{ل}{٢} \text{ لع } (١ + \frac{ق}{ن})$$

$$ص = ل \text{ لع } \sqrt{١ + \frac{ق}{ن}}$$

اننا هنا نعيد تقفي آثار الخطوات التي قادتنا الى ص ، وقد وصلنا في العلاقة المعبرة عنها الى العدد الوسطى م للرموز المختلفة التي يمكننا ارسالها بكل عينة ، وذلك بدلالة نسبة طاقة الاشارة الى طاقة الضجيج . اذا نقصت طاقة الاشارة او زادت بالمقابل طاقة الضجيج بحيث قربت النسبة  $\frac{ق}{ن}$  من الصفر ، فان القيمة المتوسطة لعدد الرموز المختلفة التي يمكننا ارسالها في كل عينة تقترب ايضاً من الصفر ، لان لع ١ = ٠ ، ويستتبع ذلك أن سعة القناة ص في هذه الحالة تقترب من الصفر ايضاً ، وعلى العكس تزداد بشكل مطرد القيمة المتوسطة المشار اليها وسعة القناة اذا زدنا النسبة  $\frac{ق}{ن}$  أي نسبة طاقة الاشارة الى طاقة الضجيج .

لقد تعاضم فهمنا الكيفية ارسال عدد متوسط كبير من الرموز المستقلة بكل عينة بأكثر مما علمنا نيكويست او هارثلي . نحن نعرف الآن أن تنفيذ ذلك بشكل فعال يقتضي بشكل عام الا نحاول اجراء عملية الترميز لرمز واحد كعينة كمون كهربائي محددة ومعدة للارسال بذاتها . على العكس يجب علينا على الدوام اللجوء الى ترميز التراكيب بحيث ترمز سلسلة طويلة من الرموز باستخدام مجموعة كبيرة متتالية من العينات . وهكذا اذا كانت نسبة طاقة الاشارة الى طاقة الضجيج هي ٢٤ ، نستطيع ارسال عدد من الرموز المختلفة بكل عينة مساو  $\sqrt{٢٤ + ١} = \sqrt{٢٥} = ٥$  بشكل وسطي ، إلا أننا لا نستطيع ارسال ٥ رموز مختلفة بواسطة عينة محددة .



أوضحنا في الشكل ٨ - ١ من الفصل الثامن كيفية إرسال الأرقام الثنائية بمعدل رقم واحد عند كل لحظة وبوجود الضجيج وذلك باستخدام إشارة موجبة أو سالبة ذات سعة معينة ، اصطلاحنا على ربطها بالرقم ١ إذا كان مجموع الإشارة والضجيج موجباً ، وربطها بالرقم ٠ إذا كان هذا المجموع سالباً . نفرض أننا نستطيع تقوية الإشارة بمقدار كافٍ بالمقارنة مع الضجيج الذي نفرضه غاوسي ، بحيث تكون نسبة الأرقام المستقبلية الخاطئة  $\frac{1}{10000}$  . تشير الحسابات إلى أن ذلك يستدعي ستة

أضعاف طاقة الإشارة مع الحفاظ على نفس عرض الحزام وطاقة الضجيج . تنجم حاجتنا للطاقة الإضافية من أننا نستخدم لتمثيل الإشارة نبضة قصيرة إما موجبة أو سالبة مقابلة لرقم ثنائي واحد ولا نستخدم إحدى الإشارات الطويلة المؤلفة من عدة عينات مختلفة ذات ساعات متباينة مقابلة لعدة أرقام ثنائية متتالية .

أما في حالة طاقة وسطية منخفضة للإشارة وطاقة عالية للضجيج ، فإن إحدى الطرق الخاصة لتحقيق سرعة مثالية في الإرسال أو الوصول إلى سعة القناة ، تجسد بتركيز طاقة الإشارة في نبضة قصيرة وقوية وإرسال تلك النبضة في إحدى اللحظات الزمنية التي تمثل منها رمزاً مختلفاً . نستطيع في هذه الحالة الخاصة وغير العادية أن نرسل وبشكل فعال الرموز بمعدل رمز عند كل لحظة .

إذا رغبتنا تحقيق حد شانون من أجل عرض حزام معين ، فيجب أن تكون عناصر الترميز إشارات موجبة معقدة طويلة أشبه بالضجيج الغاوسي .

نستطيع أن نغير نظرتنا إزاء لعلاقة الأخيرة التي أعطتنا قيمة ص ، فبدلاً من أن نتناولها من المنظور الضيق الذي تقدمه إلينا من خلاله عدد واحدات البيت في الثانية التي يمكننا إرسالها عبر قناة اتصال معينة ،

نترجمها وفق منظور آخر نطلعنا بموجبه عن امكانيات ارسال اشارة ذات عرض حزام معين وقيمة مطلوبة للنسبة  $\frac{ق}{ن}$  أي نسبة طاقة الاشارة الى طاقة الضجيج عبر قناة ارسال معينة لها بالمقابل عرض حزام ونسبة مختلفين . نفرض مثلاً ان نسبة  $\frac{ق}{ن}$  هي ١٠٠٠ ، وعرض الحزام ٤ مليون هزة في الثانية ، عندها تكون سعة القنال ص :

$$ص = ٤٠٠٠٠٠٠٠ \text{ بيت في الثانية}$$

يمكن ان نصل الى نفس سعة القنال هذه ، بقيم مختلفة للنسبة وعرض الحزام وفق الجدول التالي :

النسبة $\frac{ق}{ن}$	عرض الحزام س
١٠٠٠	٤٠٠٠ ...
٣٠٠٦	٨٠٠٠ ...
١٠٠٠٠ ...	٢٠٠٠ ...

يوضح هذا الجدول انه لتحقيق سعة قناة معينة اما ان نستخدم حزام اعرض ونسبة اخفض ، او نستخدم حزام اضيق ونسبة اكبر .

ادهشت العاملين الاوائل في نظرية المعلومات فكرة تخفيض عرض الحزام في مقابل زيادة الطاقة المستخدمة ، اذ ان هذا يستدعي كمية كبيرة من الطاقة . اثبتت الخبرة انه من المفيد والعملي ان نزيد عرض الحزام بحيث نحصل على قيمة جيدة لنسبة الطاقة الى الضجيج باستخدام طاقة اقل مما قد يلزم في احوال اخرى .

ان هذا هو ما يتم فعله ، على سبيل المثال ، في ارسال التواتر المعدل ففي هذا المثال تعتبر سعة معينة للاشارة التي سترسل ، كالوسيقى مثلاً

وترمز كاشارة راديو ذات تواتر معين . يؤدي ازدياد ونقصان سعة الاشارة المرسله الى تغير كبير جدا في تواتر الاشارة المعدلة الممثلة لها وهكذا فبارسال اشارة موسيقية عرض حزامها ١٥٠٠٠ هـ فث ان استخدام ارسال التواتر المعدل لحزام اكثر عرضا من الموسيقى التي يمثلها ، يفضي الى نتيجة مفادها ان نسبة الاشارة الى الضجيج في الموسيقى المستقبلية ستكون اكبر بكثير من نسبة طاقة الاشارة الى طاقة الضجيج في الاشارة ذات التواتر المعدل التي تصل الراديو ان طريقة تعديل التواتر لا تشكل نظاما فعالا نموذجياً ، اذ انها لا تستجيب للتحسينات التي تضيفها العلاقة الاخيرة لسعة القناة ص .

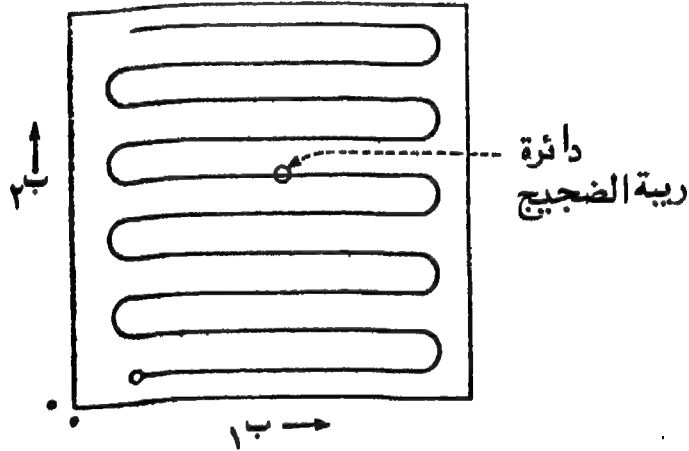
يتابع عباقرة الاتصالات وبشكل مستمر اختراع أنظمة تعديل محسنة وقد اقترح علي بعضهم واكثر من مرة أنظمة جديدة تحقق ما هو افضل من علاقة سعة القناة ص الاخيرة ، ووفق ما تسمح به السعة المثالية للقناة . كانت كل الاقتراحات معقولة من حيث المبدأ ، الا انني كنت أعلم ان شيئاً ما غير صحيح ، تماماً كما في حالة الآلات الدائمة الحركة . لقد اظهر التحليل المتأني مكان الخطأ . وهكذا تطلعنا نظرية الاتصالات على ما لا يمكن انجازه وتقتصر الممكن كذلك .

الا ان هناك شيئاً واحداً لا يمكن تحقيقه فيما يتعلق بتحسين نسبة الاشارة الى الضجيج خاصة اذا زدنا عرض الحزام ، أما هذا المستحيل فهو ان نحقق نظاماً بإمكانة التصرف بشكل منتظم ومتجاوب لكل القيم المختلفة لنسبة طاقة الاشارة الى طاقة الضجيج .

ربطنا في مطلع هذا الفصل الاشارة بنقطة في فراغ متعدد الابعاد حيث يساوي عدد هذه الابعاد عدد العينات المعتبرة . ان ارسال اشارة ذات حزام ضيق فيها عدة عينات باستخدام اشارة ذات حزام عريض فيها عدد اكبر من العينات يعني ان ننقل عملية ارسام من نقاط فراغ متعدد الابعاد الى نقاط في فراغ آخر متعدد الابعاد ذي عدد اكبر من الابعاد وان يكون هذا الارسام من نوع واحد - لواحد .

برهنا في الفصل الاول نظرية تتعلق برتسام نقاط من فراغ ثنائي الابعاد (مستوي) الى نقاط من فراغ احادي الابعاد (مستقيم) . وذكرنا في ذاك المعرض اننا اذا نفذنا ارتسام كل نقطة من المستوى الى نقطة وحيدة مقابلة على المستقيم ، فان الارتسام لا يمكن ان يكون مستمرا ، ومعنى ذلك اننا اذا تحركنا بشكل مستمر وناعم عبر مسار في المستوى من نقطة الى نقطة مجاورة ، فان المرتمس المقابل على المستقيم سيتحدد بقفزات الامام والخلف . تنطبق هذه النظرية حرفاً بحرف على كل الارتسامات من نقاط فراغ الى نقاط فراغ آخر مختلف الابعاد . يمكن لهذه الحقائق ان تعطي كل المتاعب في انظمة الارسلال حيث يمثل عدد قليل من عينات الرسالة بعدد اكبر من عينات الاشارة .

يعطي شاتون مثالا بسيطا على هذا النوع من المتاعب والموضح في الشكل ٩ - ٣ .



الشكل ٩ - ٣

نعرض اننا نستخدم عينتين من السعات : ب١ ، ب٢ لتمثيل سعة وحيدة ح ، نعتبر ان الكميتين ب١ ، ب٢ كاحداثيتين كما هو موضح

نرسم داخل المربع خطاً متلوياً يبدأ بقرب الزاوية السفلى اليسارية ويندرج في الصعود نحو الأعلى . نصلح على أن البعد مقاساً على هذا الخط هو ح كمون أو سعة الإشارة التي سترسل ، على أن يجري القياس بدءاً من أول الخط وحتى نقطة معينة منه .

تقابل أي قيمة معينة لـ ح قيمتين ب<sub>١</sub> ، ب<sub>٢</sub> . نلاحظ أن مجال ب<sub>١</sub> و ب<sub>٢</sub> أصغر من مجال ح . نستطيع أن نرسل ب<sub>١</sub> ، ب<sub>٢</sub> ، ثم نستعيد بدقة بالغة ، أو لا نستطيع ذلك ؟

لنفرض أن قليلاً من الضجيج قد تسرب إلى ب<sub>١</sub> و ب<sub>٢</sub> ، بحيث أننا إذا أردنا تحديد ح عند المستقبل فسنجد أنفسنا في دائرة من الريبة بسبب الضجيج إذا كان قطر الدائرة أقل من البعد بين لفات المسار المنحني نستطيع تحديد القيمة الصحيحة لـ ح بخطاً أقل بكثير من الخطأ في كل من ب<sub>١</sub> ، ب<sub>٢</sub> ، أما إذا كان الضجيج أكبر ، عندها لن نستطيع التأكد من لفة المنحني التي تقع عليها ح ، وبدأ سنرتكب خطأ أكبر في تقدير ح .

يبدو أنه لا مفر من هذا السلوك في الانظمة المشابهة لنظام تعديل التواترات حيث يستخدم حزام عريض بهدف الحصول على قيمة أجود لنسبة الإشارة إلى الضجيج .

عندما يزداد الضجيج المضاف إلى الإرسال ، يزداد بدوره وبشكل تدريجي الضجيج في الإشارة المستقبلية ، ألا أنه لا يلبث أن يزداد على قفزات وبشكل كارثي . يقال عند هذه النسبة للإشارة إلى الضجيج أن نظام الإرسال قد انكسر . وهنا نحن أمام مثال تطلعنا من خلاله نظرية رياضية مجردة أن هناك سلوكاً معيناً لا يمكن تحاشيه في انظمة الاتصالات الكهربائية بصورة عامة .

لقد كان التناول في هذا الفصل هندسياً بشكل أساسي . وهذه هي إحدى طرق معالجة الاشارات المستمرة ، وفي الواقع يعطي شاتون في كتابه عن نظرية الاتصالات طريقة أخرى قبلية التطبيق لكل أنواع

الاشارات والضجيج وتبقى للطريقة الهندسية اهمية خاصة ، اذ تثبت هذه الطريقة انها مثمرة وفعالة في عدة مسائل ذات صلة بالاشارات الكهربائية التي ليست من صلب نظرية الاتصالات .

وصلنا هنا الى هندسة للاشارات المحدودة الحزام بانتقاء عينات الاشارات ومن ثم اعتبار سمات العينات كاحداثيات نقطة في فراغ متعدد الابعاد . الا انه من الممكن ان نصب الاشارات محدودة الحزام في قالب هندسي دون اللجوء الى العينات ، وقد حقق ذلك فعلا الرياضيون المهتمون بمسائل ارسال الاشارات . لقد اصبح من المعتاد تمثيل الاشارات المحدودة الحزام كنقاط في فراغ اشارات متعدد الابعاد او فراغ توابع ومن ثم برهان النظريات المتعلقة بالاشارات بتطبيق اساليب الهندسة . ان للتمثيل الاخير اهمية كبرى اذ يمكن الرياضيين من استنباط وصياغة قضايا صحيحة تغطي كل الاشارات المحدودة الحزام او كل صنف الاشارات المحدودة الحزام ، دون اعتبار التفاصيل المضلة لاشارات معينة ، تماما كما يفعل الرياضيون لدى صياغتهم قضايا صحيحة عن كل المثلثات او كل المثلثات القائمة . ان فراغ الاشارات هو اداة قوية بين ايدينا ، او بالاحرى بين عقول الرياضيين المبدعين ، وكل ما نستطيعه ان نعجب ونتعجب .

كانت مهمتنا الرئيسية في هذا الفصل ، من وجهة نظر نظرية الاتصالات ، ان نبرهن نظرية تتعلق بقناة مستمرة ذات ضجيج . لقد تضمنت العلاقة الاخيرة لسعة القناة ص هذه النظرية ، حيث اعطت العلاقة المذكورة السرعة التي يمكننا وفقها ارسال الارقام الثنائية باقل ما يمكن من الاخطاء عبر قناة مستمرة حيث تبرز اشارة عرض حزامها س وطاقتها ق مع ضجيج غاوسي ابيض عرض حزامه س وطاقته ن .

كان نيكويست منذ عام ١٩٢٨ على علم بإمكانية ارسال عدد مستقل من الرموز مساو لـ ٢ س في كل ثانية عبر قناة عرض حزامها ٢ س ، الا انه كان يجهل عدد الرموز المختلفة التي يمكن ارسالها في كل ثانية من اجل نسبة معينة لطاقة الاشارة الى طاقة الضجيج . اما نحن فقد

حسبنا ذلك العدد لحالة معينة وشائعة من الضجيج ، وكذلك استطعنا ان نعرف ان امكان ارسال عدد وسطي من الرموز م لكل عينة في الثانية لا يعني نجاح المحاولة بترميز الرموز المتتالية بشكل مستقل ككمونات محددة ، على العكس يجب ان نستخدم ترميز التراكيبي ، حيث يتم ترميز عدد كبير من الرموز المتتالية دفعة واحدة .

تؤكد علاقة سعة القناة ص امكانية استخدام اشارة ذات حزام عريض ونسبة ضئيلة للاشارة الى الضجيج لتحقيق بث رسالة ذات حزام صغير ونسبة عالية للاشارة الى الضجيج ، وابرع مثالي عملي على ذلك هو تعديل التواتر . سنعود الى متابعة هذه الاعتبارات في الفصل العاشر .

كان لهذا الفصل جانب آخر ، فقد اوضحنا فيه استخدام افكار جديدة وتطبيق اداة رياضية قوية في حقل نظرية الاتصالات . لقد حققنا علاقة سعة القناة ص بتطبيق حيلة بارعة وغامضة الى حد ما هي تمثيل الاشارات الكهربائية الطويلة والضجيج المضاف اليها بنقاط في فراغ متعدد الابعاد . واصطلحنا على ان يكون مربع بعد النقطة عن مبدأ الاحداثيات في الفراغ المتعدد الابعاد هو طاقة الاشارة التي تمثلها النقطة .

وهكذا اخترلنا مسألة في نظرية الاتصالات الى مسألة مقابلة في الهندسة ، ووصلنا الى النتائج المرجوة بمناقشات هندسية محضة . ولعلنا نلاحظ ان التمثيل الهندسي للاشارات قد اضحى اداة رياضية فعالة في دراسة الاتصالات وخصائص الاشارات .

ان اختزال مسائل الاشارات الى الهندسة هو عمل مهم بعد ذاته وهو مثال حي عن قيمة البحث عن وسائل رياضية متجددة تتناسب مع التعقيد المتزايد للمسائل التي يطرحها تطور التكنولوجيا المتصلد . وكل ما نأمل ان نطبق هذا النظام في التفكير على كل المشاكل المتزايدة في الصعد الهندسية المختلفة .





## الفصل العاشر

### نظرية المعلومات والفيزياء

قدمت في الفصل الثاني لمحة تاريخية عن نظرية الاتصالات ،  
واوضحت حينئذ ان هذه النظرية وليدة الاتصالات الكهربائية ، وكما  
نعلم فان دراسة التيارات الكهربائية والمجالات الكهربائية تقع في القلب  
من الفيزياء الحديثة .

لم تكن الكهرباء لتقدم كوسيلة للاتصالات بالنسبة لمورس ومعاصريه  
الا امكانيات محدودة بالمقارنة مع الصوت الانساني او الكتابة . لقد  
كان على هؤلاء الباحثين ان يصمموا طرقا للترميز يمكن بواسطتها تمثيل  
الاحرف الابجدية بسلسلة من نبضات القطع والوصل الكهربائية . وقد  
قادت مسألة ترميز الرسائل بشكلها العام الى الافكار المحدثة حول  
موضوع الترميز . وطالما ان القضية برمتها تنحصر في البحث عن وسيلة  
للترميز باستخدام التيار الكهربائي ، فها نحن الان امام علاقة نوعية بين  
الترميز وظاهرة فيزيائية محددة . اننا امام رابطة تضم نظرية الاتصالات  
والفيزياء .

وقد رأينا ايضا ان الاشارات التي نرسلها عبر الاسلاك او بواسطة  
الراديو ستصل ممزوجة ببعض التشويشات التي اطلقنا عليها اسم  
الضجيج . وهذا امر يمكن تحاشيه الى حد ما ، اذ يمكن تخفيض الضجيج  
الذي يصل الى اجهزة الاستقبال بتبني تصميم مناسب وابتكار  
اختراعات جديدة . ففي حالة استقبال اشارات الراديو نستخدم

هوائياً يتلقى الاشارات بشكل فعال من اتجاه ارسال المصدر ويكون اقل حساسية للاشارات القادمة من اتجاهات اخرى ، كما نستطيع التأكد من ان جهاز الاستقبال لدينا يتجاوب مع التواترات التي نرغب باستخدامها ولا يابه للاشارات المتداخلة ولا للضجيج من تواترات اخرى .

وعلى الرغم من كل هذه الاجراءات ، فسيبقى هناك حد ادنى من الضجيج ممزوج مع الاشارة التي نستقبلها ، وقد يتأتى بعض هذا الضجيج من أجهزة اقلاع السيارات او مصادر طبيعية كالبرق والصواعق وحتى في حالة غياب البرق والصواعق فسيستمر الضجيج طالما بقيت حرارة في الكون . لاحظ براون ، وهو بيولوجي بريطاني ، منذ سنين عديدة ، كيف ان حبات غبار الطلع المعلقة في سائل ما تتحرك بشكل عشوائي عندما ننظر اليه في المجهر ، فبعضها يتحرك جيئة والآخر ذهابا وبعضها يتسارع ، وعلى العكس يتباطأ البعض الآخر ، دعي هذا الطراز من الحركة بالحركة البروانية ، وتنتج هذه الحركة بشكل أساسي من ارتطام الدرات والجزئيات ببعضها . . كان الانجاز العلمي المبكر لاينشتاين هو ابداع نموذج رياضي للحركة البروانية .

كان من الممكن لحبات غبار الطلع التي شاهدها براون ان تبقى ساكنة لو كانت الجزئيات المحيطة بها ساكنة ، الا ان جزئيات السائل نفسها في حركة دائمة ، وهذه الحركة بحد ذاتها هي التي تتمخض عن ظاهرة الحرارة . تتحرك جزئيات الغازات بشكل غير منتظم وبسرعة او ببطء اثناء الفترات الزمنية الفاصلة بين اصطداماتها مع جزئيات اخرى ، اما في السوائل فتحتشد الجزئيات وتتدافع عن قرب مغيرة امكنتها بشكل مستمر وبسرعة او ببطء ايضاً . يختلف الامر في الاجسام الصلبة حيث تهتز الدرات وتراوح حول مواقع سكونها النسبية ، تارة بسعات عالية واخرى بسعات منخفضة الا انها لا تغادر مواقعها بالنسبة للجوار اطلاقاً وهكذا تتحرك الجزئيات على الدوام سواء في الغازات او في السوائل او في الجوامد ، وتناسب حركاتها مع وسطي طاقاتها التي تتوقف بدورها على درجة حرارة تلك الاجسام بالنسبة للصفر المطلق ( - ٢٧٣ درجة

مثوية تقريبا ) ، وتختلف اتجاهات وسعات تلك الحركات باختلاف الطاقة والسرعة من جزئي لجزئي .

لا تقتصر الطاقة في كونها على الطاقة الميكانيكية فقط ، اذ تمتلك الامواج الكهرومغناطيسية طاقة ايضا ، وتولد هذه الامواج عن التيارات الكهربائية المتغيرة . تتكون الذرات من نوى موجبة تدور حولها إلكترونات سالبة ، بينما تتتركب الجزيئات من ذرات . عندما تهتز جزيئات مادة ما بسبب الطاقة الحرارية ، تولد الحركات النسبية لمكونات تلك الجزيئات امواجاً كهرومغناطيسية ، وتنطوي تلك الامواج على تواترات من بينها ما ندعوه بتواترات امواج الراديو ومنها الحرارة والضوء . يقال ان الجسم العار يشع امواجاً كهرومغناطيسية ، وتسمى تلك الامواج اشعاعاً .

ان معدل ما يصدره الجسم ، المحفوظ في درجة حرارة معينة ، من طاقة محمولة على امواج راديوية او حرارية او ضوئية تختلف باختلاف مادة الجسم فالاجسام القائمة تصدر من الاشعاع كمية اكبر مما تصدره الاجسام اللامعة . وهكذا فالفضة ، المعروفة بلمعاتها لانها تعكس امواج الراديو والحرارة والضوء الساقطة عليها ، هي في واقع الامر مادة قليلة الاشعاع ، في حين ان هباء الفحم للحجر الاسود اكثر اشعاعاً من الفضة . عندما يسقط الاشعاع على مادة ما ، فان الاشعاع المنعكس ، لا الاشعاع الممتص عموماً ، يختلف باختلاف تواتر الاشعاع الوارد ، من امواج الراديو الى الامواج الضوئية مثلاً . الا ان هناك قاعدة عامة تحكم كمية الاشعاع من تواتر معين ، فكمية الاشعاع الصادرة عن مادة ما في درجة حرارة معينة تتناسب مع النسبة من الاشعاع التي يمتصها الجسم عند سقوط هذا الاشعاع عليه . وهكذا فكانما هناك طبقة اشبه بالجلد حول كل مادة تسمح لكمية من الاشعاع الساقط بالمبور وتعكس الباقي ، ويبدو ان نسبة الاشعة التي تعبر تلك الطبقة الجلدية هي نفسها سواء كانت الاشعة واردة على المادة او خارجة منها ولو لم يكن الامر كذلك لاستطعنا ان نتوقع ظاهرة غريبة وغير طبيعية ( تناقض ما نعرفه من قوانين الطبيعة ) . لتتخيل لعبة محكمة الاغلاق

أو فرناً في درجة حرارة ثابتة ، وأنا كنا قد علقنا جسمين داخل هذا الفرن ، ولنفرض ( خلافاً للواقع ) أن أحد هذين الجسمين عاكس جيد للأشعاع وماص رديء له وأنه في الوقت نفسه مصدر جيد للأشعاع ، أما الجسم الثاني فنفتراض أنه ماص جيد للأشعاع وعاكس رديء له وأنه أخيراً مصدر سيء للأشعاع . لننتصور أن الجسمين كانا في لحظة معينة في درجة حرارة واحدة . أن الجسم الأول سيمتص من الأشعاع أقل مما يصدر وذلك بعكس ما يفعل الجسم الثاني الذي يمتص أكثر مما يصدر . فلو جرت الأمور على هذا النحو فإن الجسم الثاني سيسخن أكثر من الجسم الأول . ليس هذا هو واقع الأمور ، فكل الأجسام الحبيسة داخل علب أو أفران مغلقة ذات درجات حرارة واحدة ومنظمة إذ أنها لا بد ستصل إلى درجات حرارة مساوية لدرجة حرارة العلبة أو الفرن ، سواء أكانت تلك الأجسام لامعة عاكسة جيدة للأشعاع وماصة رديئة له ، أو قاتمة عاكسة رديئة وماصة جيدة . وهذا لا يمكن أن يحدث إلا إذا كانت قابلية امتصاص الأشعاع لا قابلية عكسه مساوية تماماً لقابلية إصداره كما هو واقع الحال في الطبيعة .

أن الأمر في القرن الموحد لا يقتصر على بلوغ الأجسام الحبيسة درجة حرارة واحدة ، بل أن هناك شدة أشعاع تتميز بها مثل هذه الأوعية الموصدة . لتتخيل أن ومضة من الأشعاع السائد في هذا الموحد يسقط على أحد جدرانها . أن جزءاً منها سينعكس ليصبح مجرد أشعاع في أجواء الموحد ، بينما سيمتص الجدار الآخر . سيطلق الجدار بدوره كمية معينة من الأشعاع ينضم إلى ما هو موجود في جو الموحد . وهكذا فهناك تبادل دائم للأشعاع بين جو الموحد وجدرانها .

إذا كان الأشعاع في الداخل ضعيفاً جداً ، فإن الأشعاع الصادر من الجدران سيكون أكبر مما يرد عليها ومما تمتصه . أما إذا كان أشعاع الجو كبيراً فإن الجدران ستلتقي وتمتص من الأشعاع أكثر مما تصدر إذا تساوى الأشعاع الساقط على الجدران مع الأشعاع الصادر عنها ، قيل عن الأشعاع بأنه في حالة توازن مع المادة المحيطة به . أن لهذا

الاشعاع طاقة تزداد بزيادة درجة الحرارة ، تماماً كما تزداد الطاقة الحركية لجزيئات الغاز أو السائل أو الجامد بزيادة سخونتها .

لا تتوقف شدة الاشعاع في الموصل على قابلية جدرانها لعكس الاشعاع او لامتناعه ، بل تتوقف على درجة حرارة تلك الجدران فقط . اذ لو لم يكن الامر كذلك ، وعمدنا الى صنع انبوب قصير يصل بين جوف موصل لامع ذي جدران عاكسة ، وبين جوف موصل آخر قاتم وذي جدران ماصة ، وكان الموصلان في درجة حرارة واحدة ، لحصلنا على تدفق اشعاعي من أحد الموصلين الى الآخر عبر الانبوب الا ان مثل هذا الامر لا يحصل أبداً في الواقع .

نستنتج أن هناك شدة اصدار معينة للاشعاع الكهرطيسي ، كالضوء والحرارة وأمواج الراديو ، مقابلة لدرجة حرارة معينة . إن الامواج الكهرطيسية تنتشر في الخلاء والهواء والمواد العازلة كالزجاج ، كما يمكن نقلها بالاسلاك . نستطيع في الواقع النظر الى اشارة مرسله عبر زوج من اسلاك الهاتف من منظورين مختلفين فالاشارة في الآلية الاولى تتألف من تيار الالكترونات يحركها فرق الكمون ، اما في المنظور الثاني فتتكون الاشارة من حقلين ، كهربائي ومغناطيسي ، بين السلكين وحولهما يتحركان مع التيار . وكما ان بإمكاننا اعتبار الاشارات الكهربائية في الاسلاك أمواجاً كهرطيسية وبما ان الأجسام العازلة تشع أمواجاً كهرطيسية ، فعلى ان نتوقع بالمقابل امكان أن تولد الحرارة إشارات كهربائية . وقد استطاع ج. ب. جونسون ، مكتشفه التقلبات الكهربائية المتسببة عن الحرارة ، توصيف تلك التقلبات لا بدلالة الامواج الكهرطيسية ، بل بدلالة تقلبات فرق الكمون بين طرفي مقاومة معينة .

واستطاع فيزيائي آخر ، إثر انتهاء جونسون من قياس تلك التقلبات ، استنباط الصيغة النظرية لها بتطبيق قواعد الميكانيك الاحصائي . لم يكن هذا الفيزيائي الا ه. نيكويست ، الذي ، وكما رأينا في الفصل الثاني ، قدم مساهمة كبيرة في إرساء قواعد نظرية المعلومات .

أما صيغة نيكويست والتي تدمى اليوم ضجيج جونسون أو الضجيج  
الحراري ، فتمطى على النحو التالي :

$$k = \frac{1}{4} \frac{1}{\Delta f} \frac{1}{\Delta t} \frac{1}{\Delta \omega}$$

حيث  $k$  وسطى مربع كمون الضجيج ، أي القيمة الوسطية لمربع  
كمون الضجيج عبر المقاومة المتبرة .  $\Delta t$  هو ثابت بولتزمان :

$k = 1.38 \times 10^{-23}$  جول / لكل درجة حرارة د درجة حرارة  
المقاومة مقاسة بالنسبة للصفر المطلق ، وتدمى درجة حرارة كالفن  
وتساوي درجة الحرارة المثوية مضافا إليها ٢٧٣ .  $M$  هي قيمة المقاومة  
مقاسة بالأوم . وأخيراً  $S$  هو عرض حزمة التواترات للضجيج مقاساً  
بالهزات في الثانية ( ه ف ث ) .

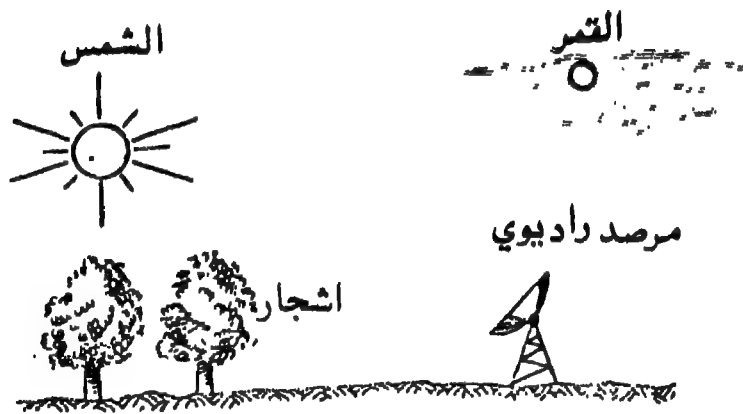
يعتمد عرض الحزمة  $S$  بالطبع على خصائص أجهزة القياس لدينا .  
فلو ضخنا الضجيج باستخدام مضخم عريض الحزمة لحصلنا على  
ضجيج أكثر مما لو استخدمنا مضخماً ضيق الحزمة وبنفس المردود .  
وهكذا نتوقع ضجيجاً أكثر في التلفزيون لأنه يضخم الاشارات عبر حزمة  
يبلغ عرضها عدة ملايين من الهزات في الثانية ، بينما يكون الضجيج أقل  
في الراديو لأنه يستخدم لتضخيم الاشارات حزمة ذات عرض يساوي  
عدة آلاف من الهزات في الثانية .

رأينا ان المقاومة الحارة تنتج ضجيج كمون فلو ربطنا بالمقاومة  
الحارة مقاومة أخرى لتدفقت الطاقة الكهربائية الى هذه المقاومة ، وإذا  
كانت هذه المقاومة الأخيرة باردة ، فستقوم الطاقة بتسخينها . وهكذا  
فالمقاومة الحارة هي مصدر كموني لضجيج طاقة . ما هي القيمة العظمى  
لاستطاعة الضجيج التي يمكن أن تغذيها ؟ تعطى تلك القيمة بالعلاقة :

$$N = 4 k T \Delta f$$

تعتبر هذه العلاقة ، على نحو ما ، أجود من سابقتها . إن لم يكن  
لسبب فلأنها تحوي عدداً أقل من الحدود ، ولم تعد قيمة المقاومة م  
ظاهرة فيها . كما أن صياغتها تتيح تطبيقها في حالات أخرى .

نفرض مثلاً أن لدينا مرصداً راديوياً ، وهو عاكس مكافئ كبير  
يقوم بتركيز أمواج الراديو على مستقبل عالي الحساسية . أوضحت  
مثل هذا المرصد في الشكل ١٠ - ١ . نفرض أننا نسلد هذا المرصد إلى  
أجسام سماوية أو أجسام أرضية مختلفة ، بهدف تلقي الضجيج الصادر  
عنها بسبب سخونتها .



الشكل ١٠ - ١

نحسب طاقة الضجيج الراديوي المستقبل باستخدام العلاقة الأخيرة  
حيث د هي درجة حرارة الجسم الذي نوجه نحوه المرصد الراديوي .

إذا وجهنا المرصد الراديوي جهة تجمع مائي أو أرض ملساء ، فما  
سيشاهده المرصد في هذه الحالة هو انعكاس للسماء ، أما إذا وجهناه  
نحو أجسام لا تعكس الأمواج الراديوية بشكل جيد ، كالأعشاب والأشجار  
المورقة ، نحصل على ضجيج مقابل للدرجة حرارة ٢٩٠ كالفن أي حوالي  
١٧ درجة مئوية ، وهي درجة حرارة الأشجار .

ولو وجهنا المرصد نحو القمر ، وكان المرصد محكم التسديد بحيث لا يرى الا القمر دون جواره ، لحصلنا على نفس الضجيج تقريباً وهو ليس ضجيج سطح القمر بل ضجيج ما تحت سطح القمر بمق حوالي السنتمتر ، ذلك لان ملدة القمر شفافة للأمواج الراديوية نوعاً ما . نذكر هنا بأن الضجيج ناجم عن درجة الحرارة .

اما اذا سدنا المرصد نحو الشمس ، تتوقف اذ ذلك كمية الضجيج على التواتر الذي تضبط المرصد لاستقباله . فإذا كان ذلك التواتر حوالي ١٠ مليون هـ ف ث ( يقابل طول موجة ٣٠ متر نحصل ) على ضجيج يقابل درجة حرارة مساوية لليون كالغن وهي درجة حرارة الهالة الرقيقة المحيطة بالشمس ، وهذه الهالة شفافة للأمواج الراديوية القصيرة ، كالفلافل الجوي الأرضي تماماً . وهكذا اذا ضبطنا المرصد على تواتر مقداره عشرة آلاف مليون هـ في الثانية نحصل على اشعاع يقابل درجة حرارة ٨٠٠٠ كالغن ، وهي درجة الحرارة السائدة فوق سطح الشمس بقليل . اما سبب ارتفاع درجة حرارة هالة الشمس بالنسبة لما تحتها ، فهو غير معروف تماماً .

يختلف الضجيج الراديوي السنملوي باختلاف التواترات ، وعندما يصل التواتر المعتبر الى عدة آلاف ملايين الهزات في الثانية يقابل الضجيج عندئذ درجة حرارة ٣٠٠ كالغن أي حوالي ٢٦٩٥٥ مئوية . أما عند التواترات الأدنى فالضجيج أكبر ويزداد باطراد كلما انخفض التواتر . تبث المجرات البعيدة على مختلف اصنافها ضجيجاً راديويًا . يحمل الاشعاع الكوني الخلفي ذو درجة الحرارة ٣٠٠ كالغن المذكورة ، تاريخ الكون بين طياته ، أما الامواج الأخرى فلها تواترات متباينة وتأتي من امكنة مختلفة .

ومهما يكن من امر فعلينا تقبل ضجيج جونسون أو الضجيج الحراري كحد أدنى لا سبيل للتخلص منه ، أما ما تفعله مصادر الضجيج الأخرى فهي انها تزيد الأمر سوءاً . ان الطبيعة الأساسية لضجيج جونسون جعلت منه معياراً في قياس حسن أداء أجهزة الاستقبال الراديوية .



يضيف جهاز الراديو ، كما رأينا ، ضجيجاً معيناً الى الإشارة التي يتلقاها ، وهو يضخم أيضاً أي ضجيج يصله نطرح الآن السؤال التالي : كم ضعفاً من ضجيج جونسون بدرجة حرارة مكافئة د<sub>ن</sub> نعتبرها مقياساً لضجيج جهاز الراديو ، وكلما كانت اصغر كان جهاز الراديو اجود .

نلقي فيما يلي بعض الضوء على درجة حرارة الضجيج د<sub>ن</sub> ، نتصور جهاز راديو مثالياً بدون ضجيج وله نفس المردود وعرض الحزمة كجهاز راديو فعلي ، ثم نرسل في هذا الجهاز المثالي ضجيج جونسون المقابل لدرجة الحرارة د<sub>ن</sub> بالإضافة الى الإشارة المستقبلية فيه . يترتب على ذلك ان نسبة طاقة الإشارة الى طاقة الضجيج في هذا الجهاز المثالي ، المضاف اليه ضجيج جونسون ، هي نفسها لجهاز الراديو الفعلي .

اذن فدرجة حرارة الضجيج د<sub>ن</sub> هي مقياس جيد لضجيج جهاز الراديو . يستخدم في بعض الأحيان مقياس آخر يعتمد على د<sub>ن</sub> ويسمى رقم الضجيج ، ويعطى بالعلاقة :

$$R_{ض} = \frac{293 + D_n}{293} + 1 = \frac{D_n}{293} + 1$$

حيث R<sub>ض</sub> هو رقم الضجيج المعروف .

إن تعريف رقم الضجيج هذا هو تعريف أرضي الطابع حيث تمتزج كل إشارة مع ضجيج مقابل لدرجة حرارة 293 كالفن تقريباً . يساوي رقم الضجيج نسبة الخرج الكلي للضجيج ، بما في ذلك ضجيج جونسون المقابل لدرجة حرارة 293 كالفن عند الدخول والضجيج المنتج من قبل الراديو ، الى ضجيج جونسون المضخم وحده .

تعتمد درجة حرارة الضجيج  $\Delta$  لجهاز راديو على طبيعة وجودة ذلك الجهاز ، أما الحد الأصغري لرقم الضجيج فيعتمد على التواتر المستعمل . يبين الجدول التالي درجات حرارة الضجيج لبعض أنواع أجهزة الاستقبال .

### درجة حرارة الضجيج - كالفن

### نوع جهاز الاستقبال

١٥٠٠

راديو أو تلفزيون جيد

٢٠

محطة استقبال مبرز لرحلات الفضاء

٥٠

جهاز استقبال مضخم

ان درجات الحرارة الفعلية لأجهزة الاستقبال الراديوية وكذلك درجات حرارة الأجسام التي نوجه نحوها هوائيات أجهزة الراديو تلك ، هي من الأهمية بمكان في نظرية الاتصالات ، لان الضجيج يحدد الطاقة اللازمة للإرسال . ان ضجيج جونسون هو من النوع الفأوسي الذي تنطبق عليه علاقة سبق أن عرضناها : وهي :

$$S = k \left( 1 + \frac{Q}{N} \right)$$

أي لإرسال  $S$  بيت في كل ثانية يجب ان توفر للإشارة استطاعة  $Q$  ترتبط مع استطاعة الضجيج  $N$  بهذه العلاقة . فإذا اعتمدنا الضجيج  $N$  من العلاقة الثانية في هذا الفصل :  $N = k T \Delta f$  نحصل على :

$$S = k T \Delta f \left( 1 + \frac{Q}{N} \right)$$

نفرض استطاعة للإشارة  $Q$  معطاة . اذا صغرنا  $S$  تصغر  $N$  بالمقابل ، اما اذا كبرنا  $S$  ، فإن  $N$  لن تكبر الى ما لا نهاية ، بل ستكبر

مقتربة على الدوام من حد معين . وعندما يصبح الكسر  $\frac{ق}{ث د س}$  صغيراً جداً بالمقارنة مع الواحد نحصل على :

$$ص = \frac{١٠٤.٤ ق}{ث د}$$

$$أي أن ق = ٠.٦٩٣ . ث د ص$$

تؤكد هذه العلاقة الأخيرة انه حتى لو استخدمنا حزمة عريضة جداً فإننا سنحتاج على الأقل لطاقة قيمتها ٠.٦٩٣ . ث د جول في كل ثانية لارسال بيت في كل ثانية ، اي اننا يجب أن نستخدم بشكل وسطي طاقة مساوية ٠.٦٩٣ . ث د جول لكل بيت من المعلومات نود إرسالها . يجب أن نتذكر أن استنتاجنا لهذه العلاقة انطلق من فرض مثالي مفاده أن علينا اعتماد طريقة للترميز تضم عدداً كبيراً من الاحرف الممثلة لكم معلوماتي غزير ثم ترمزها وفق اشارة مديدة . تحتاج معظم أنظمة الاتصالات الفعلية كمية أكبر من الطاقة لكل بيت من المعلومات ، كما لاحظنا في الفصل التاسع .

ولكن ألم ننس شيئاً ما ؟ ماذا عن الآثار الكوانتية . ربما انها ليست ذات أهمية في الراديو ، ولكنها مهمة بشكل مؤكد في الاتصالات الضوئية ، وقد انفتحت أمام الضوء مجالات تطبيقية واسعة . تنقل الالياف البصرية الدقيقة الأصوات ومختلف الحمولات الأخرى كما تتيح ومضات الضوء المنعكسة عن المرايا القمرية متابعة تغيرات بعد القمر عن الأرض بخطأ مقداره ١٠ سنتيمترات ، وكان رواد الفضاء قد تركوا تلك المرايا على سطح القمر في رحلاتهم القمرية المتتالية .

كان هاري نيكويست رجلاً مستقبلياً . لقد صاغ ضجيج جونسون لمرض حزام قدره س وفق العلاقة :

$$\frac{b \times t \times s}{\frac{b \times t}{1 - e}} = n$$

ومن ميزات هذه العلاقة إمكان تطبيقها على كل التواترات بما في ذلك الضوء . أما الكميات الواردة فيها فهي :

ن : طاقة الضجيج . ت : التواتر مقدر ب هـ ف ث

ب : ثابت بلانك ويساوي  $6.63 \times 10^{-34}$  جول . ثانية

نربط عادة بين ثابت بلانك مع طاقة فوتون واحد للضوء بالعلاقة :

$$\text{طاقة الفوتون} = b \times t$$

ث : ثابت بولتزمان . د : درجة الحرارة مقدرة بمقياس كالفن .

س : عرض حزمة التواترات .

تصبح الآثار الكوانتية ذات أهمية عندما يصبح الجداء ب  $\times$  ت مساوياً أو أكبر للجداء ث  $\times$  د . وهكذا فالقيمة الحدية للتواتر التي تصبح علاقة نيكويست الأخيرة غير صالحة لقيم التواتر الأكبر منها هي :

$$t = \frac{b \times d}{b} = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{1.0 \times 10^{-10}} = 6.63 \times 10^{-24}$$

عندما نأخذ الآثار الكوانتية بعين الاعتبار ، لا نجد ضجيجاً أكثر في التواترات العالية ، بينما نجد ضجيجاً قليلاً جداً عند التواترات الضوئية . إلا أن هناك قيوداً كوانتية غير تلك التي يفرضها الضجيج جونسون . ولكن يبقى المقدار  $6.63 \times 10^{-24}$  جول لكل بيت هو الحد العملي حتى في مجال

الضوء المرئي ويتعدى الوصول عمليا الى ذلك الحد في الاحوال الفعلية .  
 هناك طريقة شائعة وغير صحيحة للاتصال ، وهي في واقع الامر اسوأ ،  
 وتتلخص بتضخيم اشارة ضعيفة مستقبلة باستخدام مضخم جيد .  
 إن هذا ممكن من الناحية النظرية ، ولكنه سيء للمذاق ياترى ؟.

عندما تضخم نبضة ضعيفة عند تواترات منخفضة نحصل ببساطة على  
 على نبضة ذات استطاعة أكبر نستطيع قياس زمن صعودها الى ذروتها  
 وطيف تواترها تعترض علاقة هايزنبرغ للريبة في الميكانيك الكوانتي ، إذ  
 وفق هذه العلاقة لا نستطيع قياس الزمن والتواتر معا وبدقة لا متناهية .  
 إذا رمزنا للخطأ في قياس الوقت بالرمز  $\Delta t$  ، وللخطأ في قياس التواتر  
 بالرمز  $\Delta \nu$  ، فإن أحسن ما يمكننا فعله متضمن في العلاقتين :

$$\Delta \nu \times \Delta t = 1$$

$$\Delta \nu = \frac{1}{\Delta t}$$

تنطوي هذه العلاقة على حقيقة مفادها اننا إذا اقتربنا من تواتر النبضة  
 بدقة بالغة عن طريق تصغير  $\Delta t$  ، فإننا بالمقابل لن نستطيع تحديد  
 لحظة وصول النبضة بدقة كافية . وبكلمات أوضح : لا نستطيع تحديد  
 لحظة وصول نبضة طويلة ذات حزمة تواترات ضيقة بدقة كافية كما نفعل  
 في حالة نبضة قصيرة ذات عرض كبير . ولكن كم نحن عاجزون عن محاولة  
 إجراء مثل هذا القياس ؟

لنفرض اننا نضخم نبضة ضعيفة باستخدام اجود مضخم ممكن واننا  
 نزيح كل تواتراتها حتى مجال أدنى تضعف عنده الاثار الكوانتية . نجد  
 عند ذلك استطاعة الضجيج ن ممزوجة مع الإشارة المضخمة :

$$N = J B T S$$

حيث :

ت : هو تواتر الإشارة الأصلية العالية التواتر .

ج : هو الكسب الطاقي لنظام التضخيم والإزاحة .

س : عرض الحزمة يؤكد هذا الضجيج ، وفق قيمته المحسوبة هذه ، أننا لن نستطيع إجراء القياسات بدقة أكبر من تلك التي تسمح لنا بها علاقة هايزنبرغ للريبة .

يجب ان نزيد عرض الحزمة س بهدف زيادة دقة قياس الوقت ، إلا أن الضجيج الإضافي الذي يترتب على زيادة عرض الحزمة والمعطى بالعلاقة الأخيرة سينقص من دقة قياس الوقت التي وفرتها زيارة عرض الحزمة .

نستطيع باستخدام العلاقة الأخيرة واسلوب مناقشة قدمناه للتو، ان نصل الى استنتاج مفاده ان علينا استخدام طاقة لا تقل من ٦٩٣ ر. ب ت جول لكل بيت في ظل الآثار الكوانتية كي نستطيع تحقيق الاتصال بإشارة تواترها ت . تصلح هذه المناقشات لأنظمة الاتصالات التي نضخم فيها الإشارة المستقبلية باستخدام أجود المضخمات ، أي تلك المضخمات التي تضيف من الضجيج ما يكفي لإبعادنا عن تجاوز علاقة هايزنبرغ للريبة .

هل هناك بديل عن تضخيم الإشارة الضعيفة المستقبلية ؟

الإجابة نعم في حالة التواترات الضوئية . يمكن استخدام فوتونات الضوء لإنتاج نبضات كهربائية ضعيفة . تنتج بعض الأجهزة نبضات كهربائية قصيرة عندما تصلها فوتونات الضوء ، على الرغم من أنها قد تفشل أحياناً بالاستجابة لبعض الفوتونات بشكل عشوائي ، من هذه الأجهزة الخلايا الكهروضوئية . ان المردود الكوانتي العملي لهذه الأجهزة اقل من ١٠٠ ٪ .

نستطيع من وجهة نظرية ، على الرغم من ذلك ، تحديد لحظة وصول فوتون ضوئي بتوجيه ذلك الفوتون لإنتاج نبضة كهربائية قصيرة . الا يمكن ان يخالف هذا مبدأ الريبة . كلا ، لأن قياسنا للحظة وصول الفوتون بهذه الطريقة سيحول دون معرفة بأي قدر مهما كان صغيراً لتواتر ذلك الفوتون .

تستخدم عدادات الفوتونات لتحديد لحظات وصول الموجات الضوئية المنعكسة عن المرايا التي تركها رواد الفضاء على سطح القمر ، كما تستعمل أيضاً في الاتصال بإرسال الأمواج الضوئية عبر الألياف البصرية . إلا أن استخدامها لا يطابق الحالة النظرية الممكنة ، فهناك حد دون ذلك الاستخدام هو ٦٩٣ ر. ث د جول لكل بيت ، وهو حد سبق واعترضنا . لا تغير الآثار الكوانتية هذا الاداء الحدي ، ولكنها تجعل من إمكانية تحقيقه أمراً مستحيلاً . ما هو السبب ؟

أن طاقة الفوتون هي : ب ت ، أما الطاقة النظرية لكل بيت فهي ٦٩٣ ر. ث د ، وهكذا يمكننا أن نحسب كم بيت لكل فوتون من حاصل القسمة :

$$\frac{\text{ب ت}}{\text{٦٩٣ ر. ث د}} \quad \text{اي :}$$

$$144 \times \left( \frac{\text{ب ت}}{\text{ث د}} \right) \quad \text{بيت لكل فوتون}$$

كيف نستطيع إرسال طاقة مساوية لعدد من وحدات البيت بقياس لحظات وصول عدد قليل من الفوتونات أو لحظة وصول فوتون واحد . نفعل ذلك على النحو التالي : نبث من المصدر نبضة ضوئية خلال برهة من فترة زمنية طولها د مقسمة إلى برهات عددها ل ، وعند المستقبل يلعب المجال الزمني الذي تتلقى الفوتون أثناءه دور موصل الرسالة .

سيصبح هذا في أحسن الأحوال من نقل ما مقداره ل بيت من المعلومات لكل فترة زمنية د. إلا أننا لن نتلقى أي فوتونات عند بعض اللحظات الزمنية ، بينما ستصل عند لحظات أخرى خاطئة فوتونات حرارية أي فوتونات ضجيج جونسون . أن هذا هو ما يجعل الإرسال في

$$\text{حدود } 144 \times \left( \frac{\text{ب ت}}{\text{ث د}} \right) \quad \text{بيت لكل فوتون .}$$

نستطيع في الواقع العملي ارسال عدد اقل من واحداث البيت لكل فوتون لانه من غير العملي ان نسعى الى انظمة فعالة بامتكانها ارسال عدد كبير من واحداث البيت لكل فوتون .

توصلنا بتوحيد نظرية المعلومات والفيزياء الى قيمة الطاقة الدنيا اللازمة لنقل بيت واحدة من المعلومات ، وهي : ٦٩٣. ث د جول .

ان الضجيج الموجود بشكل فعلي في اجهزة الراديو المعاصرة اكبر من الضجيج المحيط لان المضخم يضيف ضجيجاً مقابلاً لدرجة حرارة اعلى من درجة حرارة المحيط . دعونا نستخدم درجة حرارة الضجيج د بدلاً من درجة حرارة الضجيج المثلة للضجيج المضاف فعلاً الى الاشارة كيف يمكننا ان نقارن الاداء الفعلي مع العلاقة النظرية :

$$ص = س لبع ( ١ + \frac{ث د س}{ق} )$$

اذا لم نلجأ الى تصحيح الاخطاء واكتفينا باستخدام قدر من طاقة الاشارة يكفي لتصبح الاخطاء في المعلومات المستقبلية قليلة الحدوث ( بحدود خطأ واحد لكل ١٠٠ ٠٠٠ ٠٠٠ بيت مستقبلية ) فان علينا استخدام طاقة لكل بيت تساوي عشرة اضعاف ما تعطيه العلاقة النظرية المذكورة .

ان اكثر انظمة الاتصالات تعقيداً هي تلك التي تستخدم لارسال المعلومات من المركبات المرتحلة في اعمق الفضاء . وهي عبارة عن اجهزة ميزر مستقبلية ذات ضجيج منخفض تتضمن الترميز وحال الترميز الالتفافي وفق مخطط فيتربي . استطاعت مركبة فويجير ارسال صور المشتري وتوابعه الى الارض ببث ١١٥٢٠٠ رقم ثنائي في كل ثانية بنسبة خطأ ٥ ٪ واستخدام استطاعة قدرها ٢١٣ واط ولا تزيد استطاعة الصوت الا بمقدار ٤ ديسibel عن الحد المثالي الناجم عن عرض تواتري لا متناه في الكبير .



يبعد بلوتو حوالي  $6 \times 10^{12}$  متر عن الأرض . ما هي سرعة الإرسال التي تستطيع مركبات الفضاء المرحلة إليه تحقيقها . نفرض أن المصدر الوحيد للضجيج هو الفضاء الكوني ، ونهمل امتصاص الغلاف الجوي .

إذا استخدمنا هوائي إرسال مساحته الفعالة  $C_r$  وهوائي استقبال مساحته الفعالة  $C_t$  ، تصبح نسبة الاستطاعة المستقبلية إلى الاستطاعة المرسله وفق علاقة فريس للإرسال مساوية :

$$\frac{C_r \times C_t}{\lambda^2 \times \lambda^2} = \frac{P_r}{P_t}$$

حيث  $\lambda$  هو طول الموجة المستخدمة في الاتصال و  $\lambda$  هو البعد بين المرسل والمستقبل ويساوي في حالتنا  $6 \times 10^6$  متر .

ننتقي بشكل اختياري مرسلًا استطاعته ١٠ واط . سنعتبر هنا حالتين . نستخدم في الحالة الأولى موجة طولها ١ سنتيمتر أو ٠.٠١ متر . يقابل طول الموجة هذا درجة حرارة للفضاء ، مساوية إلى ٣٥٠ كالفن . نفرض أن مساحة هوائي الإرسال ١٠ متر مربع وهو على شكل مربع ضلعه ٣.١٦ متر ، بينما هوائي الاستقبال هو مربع آخر ضلعه ٣.١٦ متر ومساحته ١٠٠ متر مربع . تبين العلاقة الأخيرة أنه إذا كانت الاستطاعة

١٧ -

المرسله المستقبلية  $2.8 \times 10^{-10}$  واط . إذا اعتبرنا الطاقة لكل بيت ٦٩٣ ر. ث د حيث  $D = 35$  كالفن ، نستنتج أن أجهزة الإرسال على المركبة الفضائية تستطيع إرسال ٨٠٠٠٠٠ بيت في كل ثانية ، وهي كمية ممتازة من المعلومات .

وماذا عن نظام الاتصال الضوئي نفرض ان طول الموجة  $6 \times 10^{-7}$  متر وهو يقابل تواتر قدره  $5 \times 10^{14}$  هـ ف ث ، وهذا هو الضوء المرئي . نفرض هوائيات اصغر ( عدسات او مرآيا ) ، مثلاً الهوائي المرسل مربع ضلعه ١ متر ومساحته ١ متر مربع ، والهوائي المستقبل مربع آخر ضلعه ١٠ متر ومساحته ١٠٠ متر مربع . ونفرض هنا مرة اخرى ان استطاعة الارسال هي ١٠ واط . ان درجة الحرارة الضوئية للفضاء ، أي مجموع ضوء كل النجوم ، هي كمية غير معروفة تماماً وسنفرضها هنا ٢٥٠ كالفن . نحسب سعة ارسال مقدارها ٨٠٠ مليون الف بيت لقناتنا الضوئية .

اذا تلقينا ٨٠٠ الف مليون بيت في كل ثانية ، فيجب ان نتلقى ١٠٠ بيت لكل فوتون . يبدو من غير المحتمل تحقيق ذلك . ولكن حتى لو تلقينا بيت واحد لكل فوتون فسنستطيع استقبال ثمانية آلاف مليون بيت في كل ثانية . يبدو الاتصال الضوئي افضل طرق الاتصال عبر المسافات البعيدة في الفضاء .

ان اهم جوانب العلاقة بين نظرية المعلومات والفيزياء ، من منظور نظرية المعلومات ، هي التقييم الدقيق للقيود التي لا يمكن الخلاص منها والتي تفرضها قوانين الفيزياء على عمليات الاتصال . تتركز القيود بشكل رئيسي في ضجيج جونسون والآثار الكوانتية . إلا ان هناك قيوداً اخرى كاضطرابات الغلاف الجوي التي تشوه الإشارة بشكل مغاير لما تفعله اضافة الضجيج اليها . يمكن القاء الاضواء امثلة أخرى من هذا النوع من العلاقة بين الفيزياء ونظرية المعلومات .

استغرقت الفيزيائيين فكرة ارتباط بين الفيزياء ونظرية الاتصالات مستقلة عن المسألة الاساسية التي اخذت نظرية الاتصالات على عاتقها مهمة حلها أي بإمكانيات تقييد الترميز الفعال لدى بث المعلومات عبر قناة ذات ضجيج .

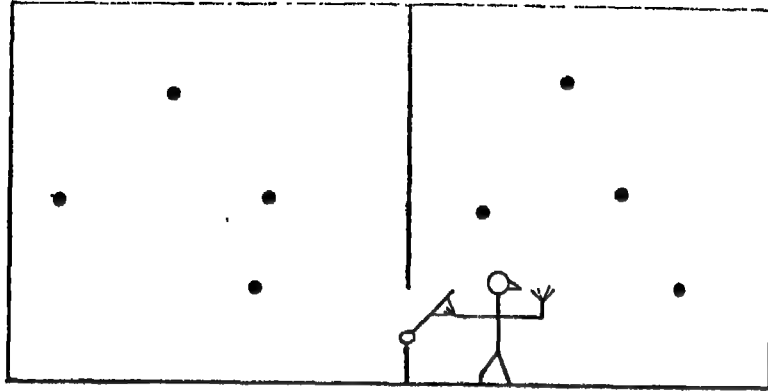
يقترح الفيزيائيون استخدام مفهوم ارسال المعلومات ليبرهنوا استحالة الآلة الدائمة الحركة من النوع الثاني . لقد سبقت هذه الفكرة ، في الواقع ، اختراع نظرية الاتصالات بي ريبا المعاصر ، فقد قدم زيلارد افكاراً مماثلة عام ١٩٢٩ .

تنتهي بعض الآلات الدائمة الحركة الى خلق الطاقة من لا شيء وهذا الفعل يخالف القانون الاول للترموديناميك ، اي قانون انخفاظ الطاقة . اما بعض الآلات الدائمة الحركة الاخرى فتفضي الى ترتيب الطاقة الحرارية الموزعة اصلاً في المادة او الاشعاع بشكل فوضوي ضمن فرص ثبات درجة الحرارة ، كما في دوران دولاب الموازنة الذي يمكن استخدامه لادارة محرك قد يقوم بتبريد بعض الاجسام وتسخين بعضها الآخر وهكذا فبإمكان هذا النوع من الحركة الدائمة نقل الطاقة من الاجسام الباردة الى الاجسام الساخنة دون استخدام طاقة منظمة اضافية .

ينص القانون الثاني للترموديناميك على استحالة نقل الحرارة من الاجسام الباردة الى الاجسام الساخنة بدون توظيف طاقة منظمة يمكن وضع هذا القانون في صيغة اخرى تقول : يستحيل تناقص الانتروبي الخاصة بأي نظام . وهكذا نرى ان الآلات الدائمة الحركة من النوع الثاني تنتهك القانون الثاني للترموديناميك .

اخترع جيمس كلارك ماكسويل اكثر الآلات الدائمة الحركة من النوع الثاني شهرة . تستخدم هذه الآلة كائناً وهمياً هو شيطان ماكسويل . يوضح الشكل ١٠ - ٢ هذه الآلة .

يقطن هذا الشيطان علية مقسومة وبإمكانه تحريك باب بين القسمين عندما يشاهد جزيئاً سريعاً يتحرك جهة الباب من القسم الآخر ، يفتح الباب ويدع هذا الجزيء يدخل ناحيته ، وعندما يشاهد جزيئاً بطيئاً مندفعا من جهته نحو الباب ، يسمح له بالمرور نحو الجانب الآخر . انه باختصار يمنع الجزيئات البطيئة من دخول قسمه والجزيئات السريعة



الشكل ١٠ - ٢

من مفادته . وهكذا يتحول الغاز في قسمه بعد فترة الى مجموعة من الجزيئات السريعة ، اي الى غاز حار ، وعلى العكس يتحول الغاز في القسم الآخر الى مجموعة من الجزيئات البطيئة اي الى غاز بارد . ان شيطان ماكسويل يستطيع تحقيق انتقال الحرارة من القسم البارد الى القسم الحار . يبين الشكل ١٠ - ٢ هذا الشيطان وهو يحرك الباب كما يشاء بإحدى يديه ، بينما يدير أنفه باليد الأخرى للقانون الثاني للترموديناميك .

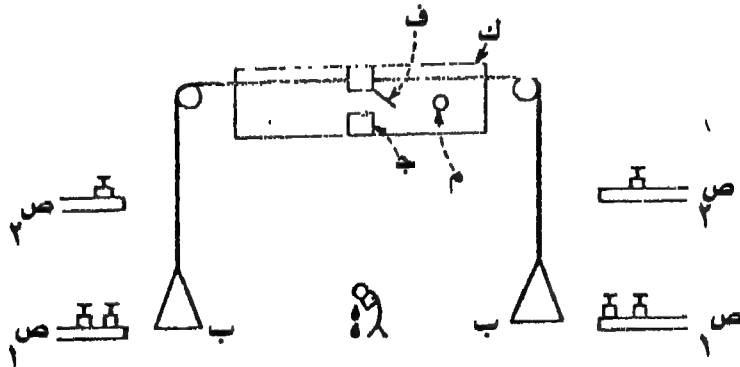
بقي شيطان ماكسويل محيراً لاولئك الفيزيائيين الذين لم يكتفوا بعدم الاكتراث به . نستطيع وضع اعتراض رئيسي ضده ، ينطوي هذا الاعتراض على ان بيئة الشيطان موجودة في حالة توازن حراري ، وان الضوء الوحيد الموجود هو الاشعاع الكهرطيسي العشوائي المقابل للضجيج الحراري ، وهو ضوء شديد التشويش لدرجة لا يستطيع معها الشيطان استخدامه لتمييز الجزيئات المندفعة نحو الباب .

يمكننا طرح بدائل أخرى لشيطان ماكسويل . ماذا لو وضعنا ، مثلاً ، باباً ذا نابض بين الحجرتين بحيث يمكن لجزيء متحرك الارتطام

به وفتحته اذا اتى من احدى الجهتين ولا يستطيع ذلك اذا اتى من الجهة الاخرى . الا ينتهي الامر الى تجمع كل الجزيئات بكل طاقتها في الجانب الذي ينفتح الباب في جهته .

يمكننا ان نضع الاعتراض التالي على الباب ذي النابض : اذا كان النابض قويا فإن أي جزيء لن يكون بإمكانه فتح الباب ، بينما اذا كان النابض ضعيفا فإن الطاقة الحرارية ستجعل الباب في حالة خفقان دائم وسيبقى مفتوحا في معظم الاوقات . كما ان الجزيئات ستنقل الطاقة الى الباب لدى فتحه . لقد اجمع الفيزيائيون على أن الاجهزة الميكانيكية المماثلة للباب ذي النابض او الدواليب المسننة الدقيقة لن تستطيع أن تنتهك القانون الثاني للترموديناميك .

ان مناقشة ماهو ممكن وماهو غير ممكن هي مناقشة بالغة الحساسية . لقد استطاع أحد الاصدقاء خداعي بآلة اخترعها ، حتى تنبأت الى حقيقة ان أرى حيز مغلق في حالة توازن حراري يحتوي على جزيئات عشوائية واشعاع كهربيسي عشوائي . الا أن هناك آلة واحدة بسيطة وهي على الرغم من كونها عديمة الاحتكاك ، مضحكة ، وغير عملية بالمعنى التطبيقي ، فالأرجح انها غير مستحيلة فيزيائيا بالمعنى الضيق الذي يستخدم الفيزيائيون به هذه العبارة . يوضح الشكل ١٠ - ٣ هذه الآلة .



الشكل ١٠ - ٣

تستخدم هذه الآلة اسطوانة ك ومكبساً عديم الاحتكاك ح . عندما يتحرك ح الى اليمين او اليسار يرفع احدى الكفتين ب ويخفض الاخرى يحتوي المكبس ح على فتحة ف يمكن فتحها واغلاقها . تحتوي الاسطوانة على جزيء واحد فقط هو م . تثبت درجة حرارة الآلة عند قيمة معينة د . سيثابر الجزيء م على فقدان وكسب الطاقة لدى ارتطامه بجدران الاسطوانة وستكون طاقته الوسطية متناسبة مع درجة الحرارة . اذا حركنا المكبس ببطء الى اليمين او اليسار وكانت الفتحة مغلقة ، لما لزم بذل اي عمل نبدا والفتحة غير مغلقة ، نضبط المكبس في المركز من الآلة ونثبتته ثم نغلق الفتحة . ندقق بعد ذلك لمعرفة الجانب من الاسطوانة الذي يتحرك ضمنه الجزيء ، ثم نضع وزن مقارنة ص<sub>١</sub> على الكفة التي تقع في نفس جهة الاسطوانة الحاوية على الجزيء . نحرر المكبس . ماذا يحصل ؟ ان الارتطام المتكرر للجزيء على المكبس سيرفع في النهاية الكفة الحاوية على وزن المقارنة ص<sub>١</sub> نفتح بعد ذلك الفتحة ، ثم نضبط المكبس في المركز من الآلة ونكرر العملية . نتلخص نتيجة عملنا باننا استطعنا رفع عدد كبير من اوزان المقارنة الى الاعلى ، وبكلمة اوضح انجزنا عملاً منظماً باستخدام طاقة حرارية غير منظمة .

كم هي قيمة العمل الذي بذلناه ؟ يمكننا ان نبرهن على ان القيمة الوسطية للقوة التي يدفع بها الجزيء المكبس هي :

$$Q = \frac{W}{L}$$

حيث ل هو البعد بين المكبس وطرف الاسطوانة في الجهة التي يتحرك ضمنها الجزئي . عندما نسمح للجزيء بدفع المكبس وسوقه ببطء الى نهاية الاسطوانة بحيث تتضاعف المسافة ، فان اكبر قيمة للعمل الذي يبذله الجزيء هو : س = ٦٩٣ . ث د

واقع الامر ان العمل المبذول لرفع وزن ثابت سيكون اقل من ذلك ، فالعلاقة الاخيرة تمثل الحد الاعلى ، ولكن هل حصلنا على ذلك بدون مقابل ؟

ليس تماماً ، فعندما ضبطنا المكبس في المركز واغلقنا الفتحة نجد انفسنا امام احتمالين متساويين يتعلق بوجود الجزئي في احدى جهتي الاسطوانة . يلزمنا كم معلوماتي يساوي بيت واحدة كي نستطيع اتخاذ القرار المناسب حول الكفة التي سنضع عليها وزن المقارنة وتصلنا هذه المعلومة ضمن نظام درجة حرارته د . ما هي القيمة الدنيا للطاقة اللازمة لارسال بيت واحدة من المعلومات في درجة حرارة د . لقد حسينا هذه القيمة للتو ، انها تساوي بالضبط ٦٩٣. ث د جول ، تساوي هذه القيمة الاخيرة الحد الاعظمي للطاقة التي يمكن للآلة ان تولدها . ينطبق هذا من حيث المبدأ على الحالة الكوانتية ، اذا فعلنا اكثر ما هو ممكن وهكذا نستخدم كل خرج الآلة لبث المعلومات الضرورية لاستمرار عمل هذه الآلة .

ان من العبث ان نناقش ما هو فعلي وممكن تحقيقه في مقابل المدردود المحدود لمثل هذه الآلة ، اذ انه وفي احسن الاحوال سنخرج من التجربة دون ربح او خسارة .

لقد بينا الان من خلال حالة بسيطة ان ارسال المعلومات وفق نهج نظرية الاتصالات يمكننا من تحويل الطاقة الحرارية الى طاقة ميكانيكية . ان واحدة البيت التي تقيس كمية المعلومات المستخدمة هي نفسها الواحدة التي نقدر بموجبهها. انثروبي مصدر رسائل في نظرية الاتصالات . اما انثروبي الترموديناميك فتقرر اي جزء من الطاقة الحرارية يمكن تحويله الى طاقة ميكانيكية . يبدو طبيعياً ان نحاول ربط انثروبي الترموديناميك والميكانيك الاحصائي بانثروبي نظرية الاتصالات .

ان انثروبي نظرية الاتصالات هي قياس الريبة فيما يتعلق باي رسالة من ضمن مجموعة ممكنة من الرسائل سيقوم مصدر الرسائل بتوليدها فعلا في ظرف معين . اذا اختار المصدر رسالة من بين عدد م من الرسائل المتساوية الاحتمال ، تكون الانثروبي مقدرة بالبيت لكل رسالة مساوية للوغاريتم م من الاساس ٢ . يتضح انه يمكن بث الرسائل

في هذه الحالة باستخدام عدد من الارقام الثنائية لكل رسالة مساو ل  
لع م . تبرز أهمية انتروبي نظرية الاتصالات بشكل عام ، من كونها  
تقيس مباشرة العدد الوسطي للارقام الثنائية اللازمة لبث الرسائل التي  
يولدها مصدر رسائل معينة .

اما انتروبي الميكانيك الاحصائي فتقيس الريبة المتعلقة بالحالة التي  
يمكن أن تكون فيها جملة فيزيائية . يفترض في الميكانيك الاحصائي أن  
كل الحالات الممكنة ، المقابلة لطاقة معينة ، متساوية الاحتمال . تساوي  
انتروبي الميكانيك الاحصائي جداء ثابت بولتزمان في لوغاريتم عدد  
الحالات الممكنة مأخوذة بالنسبة للعدد النابيري  $e$  . ولهذه الانتروبي  
أهمية عظيمة في الميكانيك الاحصائي . ومن العلاقات الهامة ، تلك التي  
تعطي الطاقة الحرة :

$$ط ح = ط - ت \times د$$

حيث ط ح الطاقة الحرة ، ط الطاقة الكلية ، ت الانتروبي ، د  
درجة الحرارة . ان الطاقة الحرة بالتعريف ، هي ذلك الجزء من الطاقة  
الكلية الذي يمكن ان يحول الى طاقة منظمة كطاقة جسم مرفوع .

ان فهم انتروبي الميكانيك الاحصائي يقودنا الى الحديث عن الجمل  
الفيزيائية جسما صلباً متبلوراً او حيزاً مغلقاً يحتوي على كمية من الماء  
والبخار او زجاجة مليئة بالغاز ، او أي مادة او مجموعة من المواد .  
سنعتبر مثل هذه الجملة في حالة توازنها أي حالة استقرارها عند درجة  
حرارة معينة وعند الحد الذي تكون لحل انتفاعلات الفيزيائية والكيميائية  
الممكنة الحدوث قد أخذت عنده مداها .

نعتبر كمثال على الجمل الفيزيائية حالة غاز مكون من جسيمات  
لا متناهية الصغر تتطاير في كل اتجاه داخل وعاء حار للغاز .



ان حالة هذه الجملة هي توصيف كامل ، او توصيف كامل بقدر ما نسمح قوانين الفيزياء ، لكل مواقع وسرع هذه الجسيمات فوق الميكانيك الكلاسيكي اي قوانين نيوتن في الحركة يكون لكل جسيم سرعته وطاقته وهكذا فهناك عدد مستمر لا نهاية له من الحالات ، كما ان هناك عددا لا نهاية له من النقاط واقعة على مستقيم او داخل مربع اما التناول الكوانتي لهذه الجملة فيصفها بعدد منفصل وغير مستمر وغير منته من الحالات . وهكذا يتشابه المنظور الكلاسيكي للمسألة مع مشكلة الاشارات المستمرة المعقدة في نظرية الاتصالات ، بينما يقابل التناول الكوانتي حالة الاشارات المنفصلة المكونة من رموز منفصلة مختلفة . ولقد تناولنا الحالة الأخيرة باسهاب في هذا الكتاب .

يحدد الميكانيك الكوانتي عددا معيناً من سويات الطاقة يمكن لجزيء من غاز مثالي ان يحتل احدها ، ويقا لعندها ان لهذا الجزيء سوية طاقة معينة كم ستكون انتروبي ذلك الغاز . اذا زدنا حجم الغاز فان ذلك ينعكس بزيادة في عدد سويات الطاقة المختلفة ضمن نفس مجال الطاقة السابق . ان هذا يزيد عدد الحالات التي يمكن للجملة ان تتخذها وبالتالي تزداد الانتروبي . يحدث مثل هذا الزدياد في الانتروبي اذا سمحنا لكمية من الغاز حبيسة في حيز معين ان تتمدد فجأة لتتلاءم حيزاً اكبر .

اذا زدنا درجة حرارة غاز مع المحافظة على حجمه احتلت جزيئاته سويات طاقة أعلى ، واصبح بالامكان دمج سويات مختلف من الطاقة لتكوين سويات جديدة ياخصار يزيد عدد سويات الطاقة وتزيد الانتروبي تبعاً لذلك .

اذا تحدد غاز بجوار مكبس بطيء الحركة ، ولم تضاف أي كمية من الحرارة الى الغاز ، تزداد السويات المختلفة في مجال معين للطاقة ، الا ان درجة الحرارة تهبط بحيث يبقى العدد الاجمالي لسويات الطاقة والانتروبي دون تغيير .

نستنتج اذن ، انه من اجل نفس درجة الحرارة ، تكون انتروبي الغاز المتجمع في حيز صغير اقل من انتروبي نفس الغاز عندما يشغل حجماً اكبر . ينطبق هذا على حالة الغاز المكون من جزيء واحد في الشكل ١٠ - ٣ ، اذ تكون الانتروبي اقل عندما تكون الفتحة مغلقة والجزيء حبيس في احد جانبي الاسطوانة ستكون الانتروبي ، اقل ، في الحد الادنى عندما نعلم في اي من جهتي الاسطوانة يسبح الجزيء .

نستطيع بسهولة حساب نقصان الانتروبي الناجم عن خفض حجم غاز مكون من جزئي واحد الى النصف مع الحفاظ على درجة حرارته . يفضي خفض الحجم هذا الى انقاص عدد حالات الغاز وتنقص الانتروبي تبعاً لذلك بالمقدار التالي :

$$\Delta S = -R \ln 2$$

اما التغير المقابل في الطاقة الحرة فهو يساوي نظير حاصل ضرب تغير الانتروبي في درجة الحرارة اي :  $\Delta G = -RT \ln 2$  .

يساوي هذا التغير ، وفق ما تقدم، العمل الذي نحصل عليه بتصنيف حجم الغاز المكون من جزيء واحد ومن ثم السماح له بالتمدد ودفع المكبس حتى يعود الى حجمه الاصلي . وهكذا فحسب الطاقة الحرة يفضي الى هذه العلاقة .

نستذكر انه في حالة الغاز ذي الجزئي الواحد تلزمنا كمية من المعلومات تساوي بيت واحدة لمعرفة موقع الجزيء ويجب ان نبث هذه المعلومة على خلفية من الضجيج تقابل درجة حرارة د ، وهذا بدوره يقتضي توفر  $R \ln 2$  .

عندما نعلم الآن ان الجزيء موجود في جهة معينة من المكبس ، فان الانتروبي تصبح اقل بـ  $R \ln 2$  . ث د مما لو كنا غير واثقين من الجهة التي يوجد فيها هذا الجزيء . يقابل هذا الانخفاض في الانتروبي ازدياد في

الطاقة الحرة مقدرة ٦٩٣. ث د جول . نستطيع أن تحول هذه الطاقة الحرة الى عمل بالسماح للمكبس بالحركة نحول الاسطوانة غير المشغول حينما يدفعه الجزيء عبر اصطدامات متتالية بسطحه . ترتفع عند هذه النقطة الانتروبي الى قيمتها الاصلية وتكون قد حصلنا من الجملة على كمية من الطاقة ، الا ان هذه الطاقة تساوي مع الاسف الحد الأدنى للطاقة اللازمة لبث المعلومات التي ابلغتنا عن الجهة التي يسبح الجزيء فيها .

نعتبر الآن حالة اكثر تعقيدا . نفرض ان الجملة فيزيائية معينة عددا من الحالات م في درجة حرارة ثابتة واننا جزانا هذه الحالات الى زمر تحتوي كل منها على  $\frac{1}{n}$  حالة ، اي ان عدد الزمر هو ن .

نبحث الآن عن الخصائص المرتبطة بانتماء الحالة التي تكون عليها الجملة الى احدى هذه الزمر . ان انتروبي المصدر وفق نظرية الاتصالات هي ل ع ن بيت ، ذلك لان هناك ن زمرة من الحالات متساوية الاحتمال . يعني ذلك انه لتحديد الزمرة التي تقع فيها حالة الجملة الفيزيائية يلزم توظيف ن رقم ثنائي . اما بث هذه المعلومات في درجة حرارة د ، فيتطلب الطاقة :

$$٦٩٣. ث د ل ع ن = ث د ل ع ن جول$$

اي ان الطاقة اللازمة لبث الرسالة تتناسب مع انتروبي مصدر الرسائل وفق نظرية الاتصالات .

اذا علمنا ان الجملة موجودة في إحدى حالاتها ذات العدد م ، تكون الانتروبية : ث ل ع م .

اما في حالة معرفتنا الاكيدة بأن الجملة في حالة تنتمي لزمرة معينة من الزمر التي تحتوي كل منها على  $\frac{1}{n}$  من الحالات ، تكون الانتروبي :

$$ث ل ع \frac{1}{n} = ث ( ل ع م - ل ع ن )$$

وهذا يشابه حالة ما بعد الارسال حين نعتبر في اي من الحالات تكون الجملة .

ان تغير الانتروبي الناجم عن المعلومات المتعلقة بتحديد الزمرة التي تنتمي اليها حالة الجملة هو : - ث لع ن .

والزيادة المقابلة في الطاقة الحرة تساوي ث د لع ن .

يسلوي هذا الطاقة الدنيا اللازمة لبث المعلومات المتعلقة بتحديد الزمرة التي تنتمي اليها حالة الجملة ، وهي المعلومات التي قادت الى إنقاص الانتروبي وزيادة القدرة الحرة .

نعتبر كمصدر رسائل اي عملية بإمكانها ان تفضي الى اي معطى يتعلق بالحالة التي قد تكون جملة ما قد اتخذتها . يولد هذا المصدر رسالة تخفض ريبتنا حول حالة الجملة المذكورة . ان لهذا المصدر ، وفق نظرية الاتصالات ، انتروبي لكل رسالة . تساوي هذه الانتروبي عدد الأرقام الثنائية اللازمة لبث الرسالة التي يولدها المصدر . ويلزم كمية معينة من الطاقة لارسال كل رقم ثنائي من الرسالة على خلفية من الضجيج تقل درجة حرارة د .

تخفض الرسالة ريبتنا فيما يتعلق بالحالة التي اتخذتها الجملة ، وهكذا تخفض أيضاً انتروبي الجملة وفق الميكانيك الاحصائي ، وهذا التخفيض يزيد بدوره الطاقة الحرة للجملة ، الا أن هذا الزدياد يساوي القيمة الصغرى للطاقة اللازمة لبث الرسالة التي أدت ازدياد الطاقة الحرة ، وهي طاقة متناسبة مع انتروبي نظرية الاتصالات :

اعتقد ان هذه العلاقة هي العلاقة المنشودة بين انتروبي نظرية الاتصالات وانتروبي الميكانيك الاحصائي . وهكذا علينا دفع ثمن ما للمعلومات التي تقود الى تخفيض انتروبي الميكانيك الاحصائي للجملة . يتناسب هذا الثمن مع انتروبي نظرية الاتصالات لمصدر الرسائل الذي يولد المعلومات . يجب ان يكون هذا الثمن مرتفعاً بما فيه الكفاية لكي تكون الآلة الدائمة الحركة من النوع الثاني مستحيلة .

يجب ان نلاحظ على كل حال ان مصدر الرسائل الذي يولد رسائل تتعلق بالحالة التي تكون عليها جملة فيزيائية ما ، هو مصدر خاص ومن نوع متفرد . تعتبر النصوص اللغوية المكتوبة او المنطوقة من اكثر المصادر شيوعاً ، الا انه لا يهمننا على الاطلاق ان نربط اية انثروبي خاصة بها بانثروبي فيزيائية الطابع ، اللهم الا من خلال الطاقة اللازمة لبث بيت واحدة من المعلومات في ظل ظروف مثالية للغاية .

تفضي معالجتنا السابقة انى ما هو غريب نوعاً ما ، فالطاقة التي نبذلها لبث المعلومات عن حالة جملة فيزيائية معينة تحول بيننا وبين معرفة الماضي بشكل مفصل . واذا لم يكن بإمكاننا معرفة الماضي بشكل كامل ، فهل نعلن ان ذاك الماضي فريد زمانه ؟ وهل هذا السؤال معقول حقاً ؟

اوجزنا في هذا الفصل بعض المشاكل المتعلقة بالاتصال كهربائياً في عالمنا الفيزيائي الواقعي . رأينا كيف ان بعض الظواهر الفيزيائية كالبروق والصواعق واجهزة إقلاع السيارات تنتج تشويشات كهربائية او ضجيجاً يضاف الى الاشارات الكهربائية التي نستخدمها لبث الرسائل . يسبب هذا الضجيج أخطاء في الارسال كما يحدد من سرعة بث المعلومات عند استخدام طاقة وحزمة تواترات معنيتين للاشارة .

ان الضجيج الصادر عن الأجسام الحارة هو ضجيج شامل بسيط ولا يمكن تجنبه وهو لذلك هام للغاية في كل أنواع الاتصالات . نشير هنا الى أن كل جسم في الكون هو في نهاية المطاف جسم حار اذا كانت حرارته أعلى من الصفر المطلق . تظهر عند التواترات العالية الآثار الكوانتية وكذلك ضجيج جونسون أو الضجيج الحراري ، ولقد رأينا تأثيرها في الحالة الحدية لحزمة لا نهائية العرض ، الا أنه مع ذلك لا يوجد مقابل كوانتي للعلاقة :

$$ص = س ل ح ( ١ + \frac{ق}{ث د س} )$$

أدى استخدام مصطلح الانتروبي في الفيزياء ونظرية الاتصالات على حد سواء إلى التساؤل عن إمكانية وجود علاقة بين هذين الوجهين للانتروبي . يمكن أن نبرهن في حالة بسيطة أن القيود المفروضة على إرسال المعلومات من قبل الضجيج الحراري تحول دون تصميم آلة يمكنها تحويل الطاقة الحرارية العشوائية إلى طاقة منظمة لثقل مرفوع ، إذ أن نجاح مثل هذه الآلة سيخرق القانون الثاني للترموديناميك . دعونا نعتبر أن بحثنا يتناول الحالة التي يمكن أن تكون عليها جملة فيزيائية معينة . كمصدر لرسائل . تساوي انتروبي هذا المصدر وفق نظرية المعلومات القدرة اللازمة لبث رسالة من المصدر على خلفية من الضجيج الحراري الموجود حتماً في الجملة المعتمدة . إن الطاقة المستخدمة لبث مثل هذه الرسالة تساوي الازدياد في الطاقة الحرة الناجم عن الانخفاض في الانتروبي الفيزيائية الناجم بدوره عن الرسالة .



## الفصل الحادي عشر السيبرنيتيك

تملك بعض الكلمات مزايا خاصة فمنها ما يثير مشاعر الرعب ، أو الإحساس بالغموض ، أو النشوة الشعرية ، فلقد وصفت المثلة دوروثي لامور بأنها ( غريبة ودخيلة ) وهي ترتدي السارونغ ( اللباس الوطني في الملايو ) . ولئن كنت لا أعلم بالضبط المعنى العام لهذه الصفة عند الناس ، إلا أنني واثق بأن كلمة أجنبي ( وهي المعنى الأصلي لكلمة exotic التي ترجمناها بالغريب أو الدخيل ) شاحبة المدلول أمام ذلك المعنى الشائع . كما أن كلمة ( الرق ) تجعلني أفكر بالمجلدات المفقودة التي كانت تحوي أسرار سليمان أو سواها من العقائد السرية ، رغم أنني أعلم أن هذه الكلمة لا تعني أكثر من مخطوط أمحت كلماته لتفسح المجال لكتابة جديدة .

ونصادف أحيانا كلمات أو عبارات لا ترتبط بمعنى محدد وواضح وتحافظ خلال فترات استعمالها على سميتها السحرية البعيدة كل البعد عن أي تفسير دارج . فعبارتا ( الناموس الأعظم ) و ( النزوة الحيوية ) وكلمة ( العزيزة ) تمثل فيما أرى نماذج منها . لكنني لا أعتقد أن كلمة السيبرنيتيك تنتمي تماما إلى هذا النوع من الكلمات وأن كانت ذات نوعية محيرة وعبر شعري .

يعرف وينر السيبرنيتيك بأنه علم التحكم والاتصال في الكائنات الحية وفي الآلات وقد اقتبس الكلمة من المرادف اليوناني لمدلول موجه دفة

السفينة . لقد ظفر علم السيبرنيتيك بشهرة واسعة منذ نشر كتاب وينر حواله عام ١٩٤٨ . وإذا قبلنا بوجود علم السيبرنيتيك فيجب أن يكون هناك من يمارسه ، وهكذا ولد مصطلح عالم السيبرنيتيك للدلالة على الشخص المتخصص في السيبرنيتيك .

ما هو علم السيبرنيتيك ؟ إذا استشرنا كتاب وينر لوجدنا أن هذا العلم يضم على الأقل نظرية المعلومات التي أصبحنا الآن ملمين بها ويقدر كاف . إنه شيء يمكن أن نسميه نظرية في الصقل والتصفية والكشف والتنبؤ ، نظرية تهتم بالبحث عن الوجود في الحاضر وتنبأ بالقيم والإشارات المستقبلية المصحوبة عادة بشيء من انضجيج وأخيراً نظرية في الآلية المؤازرة والتغذية الراجعة السلبية التي اقتفى وينر أثرها حتى وصل لكتاب ألفه جيمس كلارك ماكسويل ، نشره عام ١٨٦٨ وتناول فيه موضوع المنظم ( وهو الجهاز الذي يحافظ على سرعة ثابتة للآلة البخارية ) . يجب أن نضيف ، على ما اعتقد ، علماً آخر هو علم الأتمتة والآليات المعقدة وهذا يتضمن تعميم وبرمجة أجهزة الكمبيوتر .

ويجب ألا ننسى كل ظواهر الحياة التي تشبه بشكل أو بآخر كل أو بعض ما اتينا على ذكره . وأن نضمها تحت لواء السيبرنيتيك ، وهنا تقفز الى الذهن أمثلة من بعض الوظائف السلوكية والتنظيمية للجسم ، إلا أن وينر يذهب الى أبعد من ذلك ، ففي كتابه « أنا عالم رياضيات » يذكر أن عالم الاجتماع وعلم أصل الإنسان هما علمان أساسيان للاتصالات ، لذا يندرجان في قائمة اهتمامات السيبرنيتيك . ثم يستطرد ليقول إن علم الاقتصاد أيضاً يقع دائرة السيبرنيتيك سيما أنه أحد فروع علم الاجتماع .

لا نستطيع التشكيك بمصداقية وينر إزاء كل ما قدمناه إلا بصعوبة . لقد كان رايًا واضحاً فيما يتعلق بالتناول الإحصائي لعالم الحياة والفكر ، فبالنسبة له تحول تيسار البحث الصاعد ، عبر ماكسويل وبولترمان وجيبس ، الى قاعدة فلسفية عريضة لديه ضمنها أيضاً أخلاقيات كيرغازد .



تكمّن المشكلة في أن كل منهج من المناهج العديدة التي وضعها وينر في بوتقة السيبرنيتيك له أغراضه ومجاله الخاص . ويقتضي الأمر استخدام آلاف الكلمات لشرح تاريخ ومضمون ومنظور كل منها . لهذا فإن دمجها معاً يعني الحصول على تشكيل متباعد وغير متجانس سواء من حيث الكم أو الأهمية ، وهو لهذا أيضاً غير جذاب .

يتبين لنا مما تقدم سبب قلة عدد علماء السيبرنيتيك . وإذا أجرينا استفتاء بين جمهور العلماء عن فحوى اختصاصاتهم لأجابت نسبة ضئيلة منهم « حقل السيبرنيتيك » . لو اعتبرنا من بين هؤلاء العلماء إخصائياً في الاتصالات ، أو الآلات الأوتوماتيكية المعقدة مثل أجهزة الكمبيوتر ، أو علم النفس التجريبي ، أو علم وظائف الجملة العصبية ، وأعدنا عليه سؤالاً بالحاح « هل تعمل في حقل السيبرنيتيك » ، لتأمل فينا طويلاً محاولاً فهم خلفياتنا وأهدافنا العلمية ، وإذا قرر أننا مجرد أناس غير متخصصين نحاول فهم ما يجري إلا أكثر ، لأجابتنا عندها باقتضاب : نعم .

ما زالت كلمة السيبرنيتيك حتى الآن تحتل عناوين الصحف والمجلات غير المتخصصة ، إن لم نقل المجلات التي لا علاقة لها بالعلم على الإطلاق ، وربما أن بإمكان هذه المجلات الإفاضة في امتداح السيبرنيتيك وتبيان مزاياه بأكثر مما يستطيعه العالم . وأؤكد في هذا المعرض الأهمية المستمرة لكتاب وينر « أنا عالم رياضيات » خاصة فيما يتعلق بأسس السيبرنيتيك يضم السيبرنيتيك ، كما قدمت ، حقولاً من المعرفة متنوعة ، وإن أضيقها هو في حقيقة الأمر واسع جداً لدرجة لا أجرو معها على الإسهاب بشرحه في كتاب واحد ، حتى لو بلغ حجمه أضعاف هذا الكتاب .

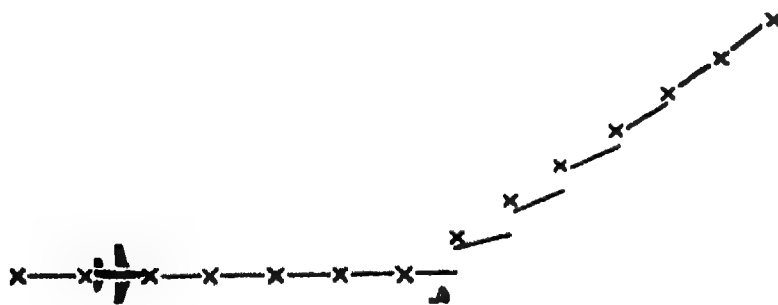
سأقتصر في هذا الفصل على محاولة عرض أفكار بسيطة تتعلق ببعض القضايا التكنيكية التي تتبادر إلى الذهن عند ذكر كلمة السيبرنيتيك . لن يكون هذا الموجز بدون فائدة ، إذ سيتمكن القارئ بفضل من كشف اهتماماته الشخصية إزاء السيبرنيتيك ، وإذا تبين أنه مهتم فعلاً ،

فسيضيف الموجز فائدة أخرى هي التعريف بنوعية المعلومات التي يتوجب على القارئ السعي ورائها لإرضاء اهتمامه .

نبدأ بالمركبة الأولى لعلم السيبرنيتيك والتي دعوتها نظرية التنبؤ وهي ذات أهمية بالغة بحد ذاتها . إن هذه النظرية في واقع الأمر هي نظرية رياضية محضة ، إلا أننا نستطيع أن نجلو بعض قضاياها بمثال عملي .

نفرض أننا أمام مشكلة استخدام معلومات رادارته نبغي بواسطتها تسديد مدفع مضاد للطائرات بهدف إسقاط طائرة معادية . يمحيطنا الرادار سلسلة من قياسات يحدد كل منها موقع الطائرة بخطأ طفيف . يتوجب علينا أن نستخرج من هذه المعلومات مسار وسرعة الطائرة مما يمكننا من التنبؤ بمواقعها في فترات لاحقة ، ومن ثم إطلاق قذيفة مناسبة إلى أحد تلك المواقع وإسقاط الطائرة بالتالي .

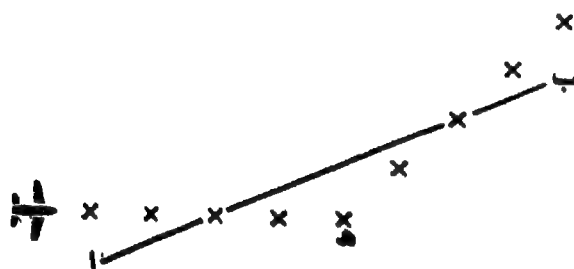
نفرض ثبات سرعة وارتفاع الطائرة . يوضح الشكل ١١ - ١ المعلومات الرادارية عن المواقع المتتالية للطائرة بإشارة  $x$  . نستطيع أن نرسم خطاً بالنظر آ ب يمكن أن يكون جزءاً معقولاً لمسار الطائرة كيف نستطيع تعليم الآلة لتقديم مثل هذا التنبؤ ؟



الشكل ١١ - ١

إذا طلبنا من الكمبيوتر أن يستخدم المعلومة الأخيرة ل ، والمعلومة السابقة لها مباشرة ن ل ، لرسم الكمبيوتر قطعة مستقيمة عبر هاتين النقطتين طبعاً هذا الإجراء خاطيء ، وعلى الكمبيوتر استخدام المعلومات السابقة أيضاً .

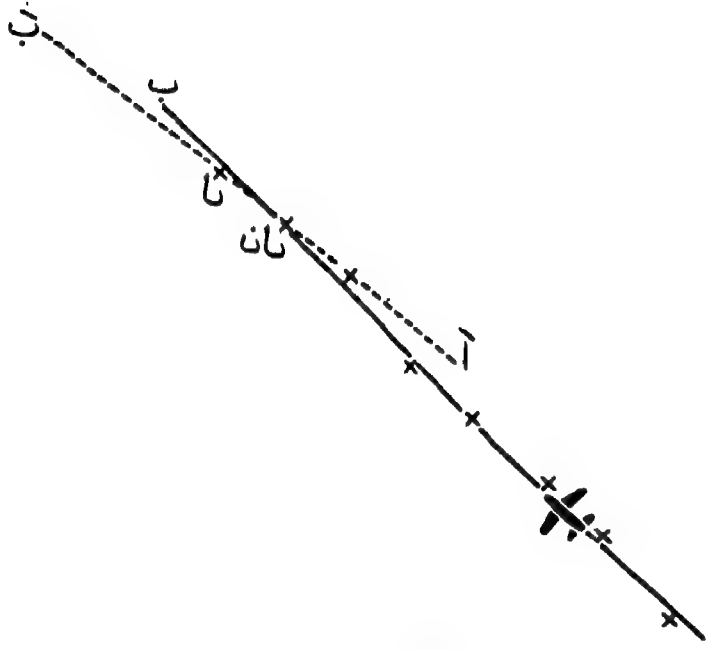
تتجسد أبسط أساليب التبادل بالنسبة الكمبيوتر في اعتبار كل النقاط واعطاء أوزان متساوية لها . إذا تصرف الكمبيوتر بهذه الطريقة وحاول ملائمة خط مستقيم لكل النقاط مأخوذة دفعة واحدة ، يحصل ربما على نتيجة كتلك الموضحة في الشكل ١١ - ٢ ، حيث قامت الطائرة بانعطاف عند النقطة هـ ، لذا فالمسار آ ب الذي حدده الكمبيوتر لا علاقة له بمسار الطائرة من وجهة النظر العملية .



الشكل ١١ - ٢

نستطيع معالجة هذه المشكلة بإعطاء أهمية أكبر للمعلومات الحديثة بالمقارنة مع المعلومات السابقة . وأبسط طرق تطبيق هذه الفكرة هي طريقة التنبؤ الخطي . يعالج الكمبيوتر في التنبؤ الخطي كل معلومة على حدة ، ( والمعلومة هنا قد تكون بعد وجهة الطائرة بالنسبة لموقع الرادار ) حيث يضرب كل معلومة بعدد يتوقفه على حداثة هذه المعلومة ، إذ سيكون هذا العدد أكبر كلما كانت المعلومة أحدث . يجمع الكمبيوتر بعد ذلك كل هذه الجداءات وينتج بذلك نبؤة على هيئة معلومة جديدة ، مثلاً بعد وجهة الطائرة بالنسبة للرادار عند لحظة لاحقة .

يمكن أن تكون نتيجة هذا التنبؤ وفق ما هو مرسوم في الشكل ١١-٣



الشكل ١١ - ٣

لقد تم هنا استخدام التنبؤ الخطي لحساب موقع وجهة متقدمين للطائرة كلما توفرت معلومة رادارية جديدة ممثلة في الشكل بإشارة x . وهكذا فمسار الطائرة المحسوب هو خط مستقيم ينطلق من الموقع المحسوب وفق الاتجاه المحسوب ، ويبقى هذا المسار معتمداً حتى ورود معلومة رادارية جديدة . نلاحظ أن الكمبيوتر يأخذ وقتاً طويلاً حتى يدخل في اعتباره حقيقة انعطاف الطائرة عند النقطة هـ ، رغم أننا أدركنا هذا الأمر مباشرة عند رؤيتنا الموقع الذي يلي النقطة هـ .

يستخدم التنبؤ الخطي المعلومات السابقة بكفاءة عالية ، إلا أن استجابته للمعلومات الجديدة تتسم بكونها استجابة بطيئة ، علماً بأن

هذه المعلومات ليست على اتساق مع سابقتها ، كالمعلومات التي حصلنا عليها في حالة الطائرة بعد انعطافها عند النقطة هـ . إذا حاولنا زيادة سرعة استجابة التنبؤ الخطي للمعلومات الجديدة ، فسننجح في ذلك ، إلا أننا سنقع في مطب آخر ، فالتنبؤ الخطي إذ ذاك لن يستخدم المعلومات القديمة بالكفاءة المطلوبة حتى لو كانت متسقة مع المعلومات الجديدة .

إن تحقيق التنبؤ الجيد حتى في حالة تبدل الظروف ، كما حدث عند انعطاف الطائرة ، يتم باستخدام التنبؤ غير الخطي ، وهذا النوع من التنبؤ يعتمد كل أساليب التنبؤ وليس فقط على ضرب المعلومة بعدد يتناسب مع قدمها ثم جمع الجداءات .

نورد فيما يلي مثالا بسيطا عن التنبؤ غير الخطي . نفرض أن لدينا متنبئين خطيين مختلفين ، يأخذ الأول بعين الاعتبار آخر مجموعة من المعلومات ثم تلقيها في حدود ١٠٠ معلومة ، بينما يعتبر الثاني العشرة الأخيرة من المعلومات فقط . نفرض أننا سنستخدم كل متنبئ على حدة لحساب ما ستكون عليه المعلومة التالية التي سترد ، ثم نقارن المعلومة الواردة فعلا بكل التنبؤين . نصوغ معياراً للاختيار بين المتنبئين وفق ما يلي . نفرض أن المتنبئ الأول استطاع تقديم ثلاثة تنبؤات كانت أقرب للمعلومات الفعلية ، عندها نتبنى هذا المتنبئ الأول ، وإلا فنفرض أن الطائرة تناور بطريقة تقلل وفقها من أهمية المعلومات القديمة ، ولا نجد عندها مناصاً من تبني المتنبئ الثاني . إن هذه الطريقة في الوصول إلى التنبؤ النهائي هي طريقة غير خطية ، إذ لم تتم صياغة التنبؤ بمجرد ضرب كل معلومة بعدد يتوقف على قدمها ، بل على العكس زدنا أو قللنا من اهتمامنا بالمعلومات القديمة وفق طبيعة المعلومات الجديدة .

وبشكل عام ، هناك عدد لا نهاية له من طرق التنبؤ غير الخطي وفي الواقع ، فالتنبؤ غير الخطي ومعه كل العمليات الأخرى الغير خطية ، هي المجموعة الشاملة لكل الطرق لتباعدة ، بعد استثناء أبسط الأساليب

اي التنبؤ الخطي والعمليات الخطية الاخرى . نعرف اليوم الكثير عن التنبؤ الخطي ، ولا نعلم بالمقابل إلا القليل عن التنبؤ غير الخطي .

اوردنا مثال التنبؤ بمواقع الطائرة لكي نمكن القارئ من تحسس الفكرة التي كانت ستبدو لا معنى لها لو عرضناها بشكلها المجرد . إلا اننا مع ذلك نستطيع طرح المسألة الاعم .

لنتخيل عدداً من الاشارات الممكنة . يمكن أن تكون هذه الاشارات من اشيء متباعدة كمسارات محتملة للطائرات أو كلمات مختلفة قد ينطق بها انسان ما ، ولنتخيل أيضاً بعض الضجيج أو التشويه ، فلربما أن المعلومات الرادارية غير دقيقة بما فيه الكفاية ، أو أن الرجل يتحدث في غرفة مملأ بالضجيج . نطلب منا في هذا الوضع حساب بعض أوجه الاشارة الصحيحة : مثلاً : الموقع الحالي أو المستقبلي للطائرة ، الكلمة التي تفوه بها الانسان للتو أو التي سيتفوه بها بعد قليل . نستخدم معلوماتنا الاحصائية عن الاشارة لاتخاذ قراراتنا المناسبة ، ويمكن أن يكون من بين هذه المعلومات : المسارات الأكثر احتمالاً للطائرات ، أو عدد مرات الانعطاف وحدة كل انعطاف ، كما يمكن لهذه المعلومات الاحصائية أن تضم اصناف الكلمات الأكثر شيوعاً واحتمال ورودها بالنسبة لما يسبقها . نفرض أخيراً أن لدينا معلومات احصائية مشابهة عن الضجيج والتشويه .

يتضح أننا نستخدم هنا نفس نوعية المعلومات التي توخفها نظرية الاتصالات . إلا أننا في نظرية الاتصالات نعتبر مصدراً للمعلومات وقناة ذات ضجيج ، ثم نبحت عن اميز طريقة لترميز الرسائل التي يولدها المصدر بغية بثها بأجود الشروط عبر القناة المفروضة ، أما في التنبؤ فننطلق من مجموعة من الاشارات شوهها الضجيج ثم نتسائل عن كيفية كشف الاشارة الفعلية ، أو حساب جانب منها أو التنبؤ به ، مثلاً كقيمة الاشارة عند لحظة مستقبلية .

يتألف الجهاز الرياضي للتنبؤ من النظرية العامة للتنبؤ الخطي التي ابدعها كولوموغروف ووينر ، الى جانب التحليل الرياضي لعدد من نوع خاص من المتنبئين اللاخطيين . أشعر أنني لا أستطيع المضي أبعد من هذه العبارة ، إلا أننا لا نستطيع أن أقاوم اندفاعي لاعطاء مثال عن نتيجة نظرية اعتبرها مذهشة ، وقد صاغها سليبيان ، وهو رياضي طبعاً .

لنتخيل حالة إشارة خافتة قد تكون أو لا تكون محاطة بضجيج قوي . ومهمتنا أن نقرر فيما إذا كانت الإشارة موجودة فعلاً أم لا . يمكن أن يكون الضجيج والإشارة كمونات كهربائية أو انضغاطات صوتية . نفرض أن الضجيج والإشارة قد اتحدا بإضافة أحدهما للآخر بكل بساطة ، وأن كلاهما عبارة عن مصدر مستقر ولكل منهما حزمة تواتر محددة . نضيف أننا نعلم وبدقة طيف تواتر الضجيج ، أي بشكل أوضح ماهي نسبة طاقة الضجيج الواقعة في كل حيز صغير من مجال التواترات ، بينما طيف تواترات الإشارة مختلف عن ذلك . أثبت سليبيان أننا إذا استطعنا قياس التكمون الكلي أو ضغط الصوت للإشارة مع الضجيج وبشكل دقيق عند كل لحظة من أي فترة زمنية مهما كانت قصيرة ، نستطيع تحديد فيما إذا كانت الإشارة موجودة مع الضجيج أم لا وبدون خطأ يذكر ومهما كانت الإشارة خافتة . نشير الى أن هذه النتيجة هي نتيجة نظرية وليست مجرد تطبيق عملي مفيد . لقد كانت نظرية سليبيان هذه بمثابة الصدمة للكثيرين سيما أولئك الذين أكدوا أنه إذا كانت الإشارة ضعيفة بحد معين ، بل وحسبوا ذلك الحد ، فإنه لا يمكن كشفها بتفحص مجموع الإشارة والضجيج خلال أي فترة زمنية .

سأوضح ، قبل اغلاق هذا الموضوع العام ، لماذا ربطت به صفتي التنبؤ والكشف ، إضافة لصفتيين آخرين هما الترشيح والتنعيم . إذا كان طيف التواتر للضجيج المختلط مع الإشارة مختلفاً عن طيف تواترات الإشارة ، أمكننا فصل الإشارة عن الضجيج باستخدام مرشح كهربائي يقطع التواترات السائدة في الضجيج بالمقارنة مع التواترات السائدة في الإشارة . إذا استخدمنا مرشحاً يقتلع كل أو معظم مركبات لتواتر

العالية التي تتغير بسرعة مع الوقت ، فاننا نحصل على خرج ابطأ في تغيره بالمقارنة مع الدخل ، نقول عندها اننا قمنا بتنعيم مزيج الاشارة والضجيج .

تحدثنا حتى الآن عن جملة من العمليات نجريها على مجموعة من المعلومات بهدف حساب الاشارة الحاضرة او المستقبلية وكذلك كشفها . ويرتب على هذا الحساب و الكشف فعل ما ننوي القيام به .

من الممكن مثلاً ان ندفع طائرة صديقة لطائرة عدوة او نستخدم الرادار لمراقبة الطائرة العدو . يزودنا كل راصد جديد بمعلومات قد تجعلنا نغير خطتنا ازاء العدو .

تعرف الآلية المؤثرة على انها جهاز يعمل بشكل مستمر استناداً لقاعدة معلوماتية بهدف تحقيق غاية ما وضمن معطيات متغيرة . لدينا الآن عنصر هام جديد ، فالرادار يقيس موقع الطائرة المعادية بالنسبة لطايرتنا وهكذا تستخدم معلومات الرادار لتقرير التغييرات الضرورية في موقع طايرتنا . تفدى معلومات الرادار بشكل راجع يؤدي لتغيير معلومات الرادار التي سترد في وقت لاحق ، ذلك لان هذه المعلومات ستستخدم في تغيير موقع الطائرة الذي سيتم عنده استقصاء المعلومات الرادارية الجديدة . توصف التغذية الراجعة بكونها سلبية لانها تستخدم لانقاص الابتعاد المحتمل عن سلوك معين بدلاً من زيادته .

يمكننا ببساطة تصور امثلة اخرى عن التغذية الراجعة السلبية . يقيس منظم السرعة في الآلة البخارية سرعة تلك الآلة ، تستخدم القيمة المقاسة لفتح أو اغلاق الصمام بحيث تتم المحافظة على السرعة عند حد معين . وهكذا تفدى نتيجة قياس السرعة بشكل راجع لتغيير تلك السرعة . يقيس الترموستات حرارة الغرفة ويطفئ تباً لذلك او يشعل أجهزة التدفئة بحيث يحافظ على درجة حرارة ثابتة للفرقة - عندما يمشي احدنا وفي يديه صينية فيها ماء ، فانه يجنح الى مراقبة الماء



وموازنة الصينية بحيث لا ينسكب الماء ، الا ان لهذا نتائج سيئة ، فكلما امل صديقنا الصينية بهدف منع انسكاب الماء تحرك الماء بشكل اعنف في الصينية . عندما نطبق التغذية الراجعة لتغيير عملية بالاستناد الى حالتها الملاحظة يصبح وضعها برمته غير مستقر ، بكلمة مختصرة بدلاً من انقاص الانحرافات الصغيرة بالنسبة للهدف المرسوم ، يمكن ان تؤدي التغذية الراجعة لزيادة تلك الانحرافات .

ان هذا مشوش للغاية في حالة دارات التغذية الراجعة . اذا اردنا جعل التصحيحات اكثر كمالاً علينا تقوية التغذية الراجعة . الا ان هذا يفضي بدوره لعدم استقرار الجملة ، والجملة غير المستقرة ليست مرغوبة كما هو معلوم ، اذ ان مثل هذه الجملة قد تفضي الى سلوك مشابه لابتعاد الصاروخ عن الطائرة المعادية بدلاً من ملاحقتها ، ولانخفاض درجة حرارة الغرفة وارتفاعها على شكل قفزات ، او لاسراع آلة معينة وتوقفها واخيراً لبث اغنية ما من مضخم دون تغذية ذلك المضخم بأي دخل .

لقد درس استقرار أنظمة التغذية الراجعة السلبية بعناية فائقة ، وقد تم تحصيل كم معلوماتي كبير من هذه الأنظمة ، حيث تسلي السعة الحالية مجموع السمات السابقة مضرورية بأعداد تتناسب مع البعد الزمني لتلك السمات عن اللحظة الراهنة .

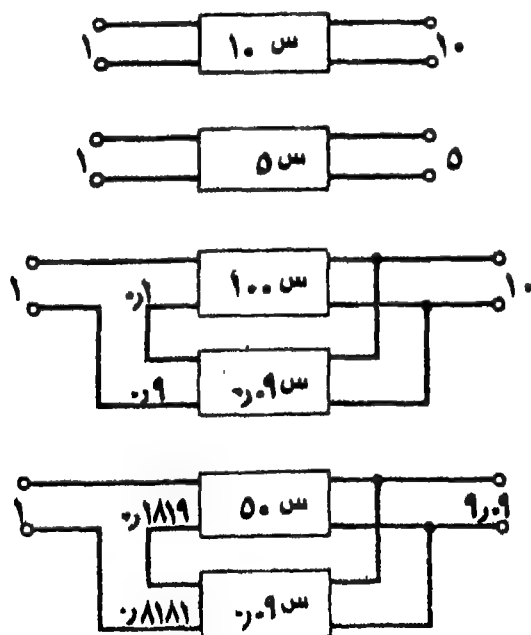
تتسم أنظمة التغذية الراجعة السلبية بكونها اما مستقرة او غير مستقرة وذلك بصرف النظر عن الاشارات المغداة اليها . اما أنظمة التغذية الراجعة غير الخطية فيمكن ان تكون مستقرة لبعض انواع الدخول وغير مستقرة لانواع أخرى . تمثل السيارة القديمة غير المتماسكة والمرتجفة نظاماً لا خطياً ، اذ يمكن ان تكون حركتها مستقرة على طريق سوي ناعم ، الا ان نتوءاً صغيراً قد يصادفها سيجعلها ترتجف وسيستمر ذلك الارتجاج حتى بعد تجاوزها للنتوء بمسافة طويلة .

لقد غطى معظم الجهد النظري المبذول في مجال أنظمة التغذية الراجعة السلبية ، قطاعاً آخر من الموضوع لم نتطرق اليه بعد ويتعلق بجهاز

اخترعه هارولد بلاك عام ١٩٢٧ يعرف باسم المضخم ذي التغذية الراجعة السلبية .

يعرف مردود المضخم على انه نسبة كمون الخرج الى كمون الدخل .  
تبرز اهمية خاصة لاستخدام مضخمات ذات مردود ثابت في الهاتف وفنون الالكترونيات الاخرى ، الا ان الانابيب المفرغة والترانزستورات هي اجهزة غير كاملة اذ يتغير مردودها مع الوقت كما يتوقف ذلك المردود على قوة الاشارة . تلعب المضخمات ذوات التغذية الراجعة السلبية دوراً أساسياً في التقليل من اثر هذه التغيرات في مردود الترانزستورات والانابيب المفرغة .

يتضح لنا سبب ذلك من خلال تفحص الشكل ١١ - ٤



الشكل ١١ - ٤

لدينا في الأعلى مضخم عادي مردوده عشرة ، اي اذا طبقنا كمون دخل مقداره ١ فولط على اليسار ، نحصل على كمون خرج مقداره ١٠ فولط على اليمين . نفرض أن المردود انخفض الى النصف ، نحصل بذلك على كمون خرج مقداره ٥ فولط كما هو مبين في القسم التالي من نفس الشكل .

يوضح القسم الثالث من الشكل مضخماً ذا تغذية راجعة سلبية صمم لتحقيق مردود قدره عشرة . وهو يتألف من علبتين ، العليا هي مضخم مردوده مئة يربط خرجه الى علة تقسيم كمون دقيقة للغاية لا تحتوي على ترانزستورات او انابيب ولا تتغير بتغير الوقت او تغير مستوي الإشارة . يتألف دخل العلة العليا من كمون الدخل ١ فولط مطروحاً منه خرج العلة السفلى وهو يسوي جدار ٩٠.٠. في كمون الخرج ١٠ فولط أي ٩٠.٠ فولط .

نفرض الآن أن الانابيب او الترانزستورات في العلة العليا تتعرض للتغير ، بحيث تعطي العلة مردود خمسين بدل المردود السابق المساوي لمئة ، يوضح القسم الاخير من الشكل هذه الحالة . نشير الى أن الأرقام المعطاة فيه هي مجرد أرقام تقريبية ، الا أن الملاحظة المطلوبة هي أن انخفاض المردود الى النصف لم يؤثر على الخرج بأكثر من ١٠ ٪ ، ولو كان هذا المردود أعلى لكان الأثر على الخرج أقل .

لا يمكننا التقليل من أهمية التغذية الراجعة السلبية إطلاقاً ، فالمضخمات من هذا الطراز هامة في الاتصالات الهاتفية ، كما أن الترموستات مثال حي على نجاعة استخدام هذه التغذية . تستخدم التغذية الراجعة السلبية للتحكم في العمليات الكيميائية في المصانع و في متابعة الصواريخ للطائرات المعادية . كما أن الطيارين الآليين على متن مختلف انواع الطائرات يستفيدون من التغذية الراجعة السلبية في الحفاظ على الطائرة ضمن مسار معين .

ويشكل أكثر عمومية ، استخدام التغذية الراجعة السلبية من عيني الى يدي لتوجيه القلم أثناء الكتابة ، وكذلك من أذني إلى لساني وشفتي لتعلم الكلام أو تقليد صوت آخر . تستخدم عضوية الحيوانات التغذية الراجعة السلبية بأشكال مختلفة ، وهذا مثلاً ما يجعلها تحافظ على درجة حرارة ثابتة في داخلها رغم تقلبات الطقس حولها ، وكذلك يمكنها من تثبيت الخصائص الكيميائية للدم والنسج . يطلق على قابلية الجسم للاحتفاظ بقطاع محدد من الخصائص رغم تغير المحيط اسم التوازن البدني .

يعد ج. روس . آشي واحدًا من كبار علماء السيبرنيتيك ، وقد كان معلم نفسه . بنى آشي آلة دعاها موازن البدن لعرض تظاهرات الموازنة مع البيئة التي يعتقد أنها تشكل الميزة الأولى للحياة . وقد زودها بعدد من دارات التغذية الراجعة وواسطتين لتغييرها ، يتحكم في واحدة منها الموازن البدني ، بينما يتحكم في الأخرى الشخص الشرف على تشغيل الآلة والذي يلعب دور البيئة . إذا تغيرت دارات الآلة استجابة للبيئة بحيث تصبح في حالة عدم استقرار ، فإن الآلة لا تلبث أن تعيد ضبط الدارات بالمحاولة والخطأ بهدف العودة إلى الاستقرار مرة ثانية .

يمكننا إذا شئنا تشبيه سلوك الموازن البدني هذا بحالة طفل يحاول تعلم المشي دون أن يقع ثم تعلم قيادة الدراجة دون أن ينقلب وكذلك بحالات أخرى كثيرة نتعرض لها في حياتنا . يؤكد وينر في كتابه « السيبرنيتيك » على دور التغذية الراجعة السلبية كعامل هام للتحكم العصبي ، كما يؤكد أن بعض الإعاقات كارتجاج الأيدي تسبب مباشرة عن اضطراب نظام التغذية الراجعة السلبية في الجسم .

عرضنا حتى الآن ثلاثة مكونات للسيبرنيتيك : نظرية المعلومات ، الكشف والتنبؤ بما في ذلك التنعيم والترشيح ، وأخيراً التغذية الراجعة السلبية متضمنة الآليات المؤازرة والمضخمات ذوات التغذية الراجعة السلبية . نقرن عادة أجهزة الكمبيوتر والأدوات المعقدة الأخرى المشابهة

مع السيبرنيتيك . تستخدم كلمة الامتة أحيانا للإشارة الى هذه الآلات المتقدمة .

يمكن للباحث أن يجد للتكنولوجيا المعاصرة جدورا في انجازات القرون الغابرة ، إلا أن دراسة تلك الاصول لن تقدم الكثير على صعيد فهم هذه التكنولوجيا . يتعلم الانسان بالعمل ومن خلال التأمل بما عمله . لقد زادت امكانيات العمل في حقل الآلات المعقدة بشكل لم يسبق له مثيل بالمقارنة مع الازمان السالفة كما ان محرضات التفكير قد تنامت الى حدود لا يمكن الاحاطة بها .

ان تقني الآثار التاريخية للآلات المعقدة يصل بنا الى المقاسم الهاتفية الآلية التي شاهدت النور لأول مرة في النصف الثاني من القرن الماضي ، وكانت تلك المقاسم بدائية تعمل بأسلوب الخطوة - خطوة حيث تعتمد آلية محددة لتوضيع قطاع معين من حلقة الاتصال الهاتفية كلما تم تسجيل أحد مكونات الرقم الهاتفي الذي ننوي مخاطبة صاحبه . تطورت هذه المقاسم الى أنظمة التحكم الشاملة ، حيث لا تشغل الأرقام قواطع المقسم بشكل مباشر ، اذ يخزن الرقم أولا ، أو يمثل كهربائيا أو ميكانيكيا في أحد أجزاء المقسم . تختبر بعد ذلك آلية كهربائية في جزء آخر من المقسم الدارات الكهربائية التي يمكن استخدامها لوصل طالب المخابرة بالرقم المطلوب حتى يجد واحدة غير مشغولة يستخدمها لتحقيق الاتصال المنشود .

تتسم المقاسم الحديثة بتعقيد بالغ وحجوم كبيرة ، اذ تصمم أصلا لوصل كل مدن وقرى قطر معين ببعضها في شبكة اتصال مباشر ، لهذا تعد هذه المقاسم قمة التكنولوجيا التي أبدعها الانسان ويستدعي وصف جزء من عملها عددا كبيرا من الكلمات . ان إدارة قرض التلفون تعني اليوم البحث عن أكثر الخطوط اقتصادية لاستخدامه في وصل الطالب بالرقم المنشود ، وربما في عملية التفاف حول العديد من المدن اذا كان معظم الخطوط مشغولا . وما يفعله المقسم بعد تحقيق الاتصال هو

توقيت المخابرة وقياس مدتها وتحديد أجرتها تبعاً لذلك ، كما أنه سيفصل كل الدارات المرتبطة إذا قطع أحد الفريقين المخابرة ، وما هو أهم من ذلك أن المقسم يبلغ كومبيوتراً مركزياً عن الاعطال التي قد تحدث فيه ، ويستمر بالعمل رغم حدوث تلك الاعطال .

لعل من أهم مكونات المقاسم الهاتفية العناصر المعروفة باسم الحاكمت الكهربية . تتألف الحاكمة الكهربية من مغناطيس كهربي ذي نواة مغناطيسية تقف قبالتها رقاقة معدنية صغيرة متحركة تفلق في أحد اتجاهي حركتها دائرة كهربية عندما تمس قطعاً أخرى ثابتة ( على غرار آلية عمل الجرس الكهربي ) . عندما يمر التيار الكهربي في وشيعة المغناطيس الكهربي ، تنجذب الرقاقة المغناطيسية وتتحرك ، وتكون النتيجة أن بعض الرقاقت المتحركة تبتعد عما يقابلها من القطع الثابتة فتفتح قسماً من الدارات ، بينما تقترب رقاقت متحركة أخرى من قطع ثابتة مقابلة وتغلق قسماً آخر من الدارات .

طبق ج. و. ستيتيز من شركة بيل في الثلاثينات من هذا القرن تكنولوجيا الحاكمت والمركبات الأخرى للمقاسم الهاتفية في بناء آلة حاسبة كبيرة كان بإمكانها تنفيذ العمليات الحسابية الأربعة مهما بلغت من التعقيد . تابعت شركة بيل إنتاج أجهزة الكومبيوتر وفق نفس الأسس أثناء الحرب العالمية الثانية لأغراض عسكرية . أما هوارد ايكن وزملاؤه فقد بنوا أول كومبيوتر يعتمد الحاكمت الكهربية في جامعة هارفارد عام ١٩٤١ .

أتت الخطوة الأساسية في زيادة السرعة لأجهزة الكومبيوتر بعد فترة قصيرة من الحرب على يد ج. ب. ايكرت و ج. و. موشلي اللذان بنيا جهازايناك وهو كومبيوتر يعتمد الانابيب المفرغة ، وقد حلت مؤخراً الترانزستورات والدارات المتكاملة محل الانابيب المفرغة في بناء أجهزة الكومبيوتر .

وهكذا فقد كانت الفترة الحاسمة من تاريخ الآلات المعقدة هي فترة تحقيقها وتصنيعها ، أولاً باستخدام الحاكمات ومن ثم باستخدام الانابيب المفرغة والترانزستورات .

لم يتحقق بناء الاجهزة المعقدة عند توفر العناصر المطلوبة وحسب ، بل كان من الواجب رسم المخططات السليمة لربطها ببعضها بغية تنفيذ مهمات معينة كالتقسيم والضرب . كان من أهم أعمال ستيبيتز وشانون تطبيق جبر بول ، وهو فرع من المنطق الرياضي ، على توصيف وتصميم الدارات المنطقية .

وهكذا فقد تكامل بناء الآلات المعقدة الهادفة لحل مشاكل معينة بتوفير المركبات المناسبة وابداع التصميمات المبتكرة لربطها ببعضها . ان التنظيم ، وهو جوهر الآلة ، أساسي وحاسم ، إلا ان الآلة لم تكن لتوجد لولا تصنيع مكوناتها .

كانت الآلة الحاسبة التي بناها ستيبيتز بلا روح ، إذ كان المشغل يغذيها بزواج من الاعداد العقدية فتهتز وترتجفه ، ثم تستجيب باعطائه المجموع ، الفرق ، الجداء ، أو حاصل القسمة . إلا أنه استطاع عام ١٩٤٣ تصنيع كومبيوتر باستخدام الحاكمات ، كان يتلقى التعليمات ( أي البرنامج ) بواسطة شريط ورقي طويل ، وكان هذا البرنامج يتضمن العمليات المطلوب اجرائها والاعداد التي ستجري عليها هذه العمليات .

تحققت خطوة متقدمة في الكومبيوتر عندما أصبح بالإمكان الاستعانة بقسم سابق من شريط البرنامج لإكمال مهامه ، أو استخدام شريط برنامج جانبي للمساعدة في حساباته . لقد أصبح بإمكان الكومبيوتر في هذه الحالة اتخاذ قرار ما عند بلوغه نقطة معينة ، ومن ثم متابعة العمل استناداً لهذا القرار . نفرض ان الكومبيوتر كان يصدد حساب المتسلسلة التالية : وذلك بإضافة حدودها حداً إثر حد :

$$1 - \frac{1}{3} + \frac{1}{5} - \frac{1}{7} + \frac{1}{9} - \frac{1}{11} + \dots$$

يمكن أن نبرمج الكمبيوتر بحيث يتابع إضافة العدود حتى يقابل حداً أقل من  $\frac{1}{1000000}$  ويطبع المجموع عند ذلك ثم ينصرف الى حسابات أخرى . يتخذ الكمبيوتر قران بطرح آخر حد قام بحسابه من  $\frac{1}{1000000}$  ، فاذا كانت النتيجة سالبة قام بحساب حد جديد و اضافته الى المجموع السابق ، اما اذا كانت النتيجة موجبة طبع المجموع اذ ذاك على الطابعة وانتقل الى الجزء التالي من البرنامج لتابعة بقية التعليمات .

اقتترنت القفزة الكيفية الكبيرة التالية في تطوير اجهزة الكمبيوتر باسم جون فون نويمان الذي وسع استخدام اجهزة الكمبيوتر الاولى في حسابات تتعلق بالقنابل الذرية . لقد امتلكت ، حتى اجهزة الكمبيوتر الاولى ، مخازن او ذاكرات ، تحفظ فيها وبشكل مؤقت النتائج المتوسطة للحسابات التي لا تلبث ان تستخدم في اكمال هذه الحسابات ، كما تحتفظ تلك الذاكرات بالنتائج النهائية تمهيداً لطبعها . طرح فون نويمان فكرة خزن البرنامج في ذاكرة الكمبيوتر بدلاً من تغذيته به على شريط ورقي . لقد جعل ذلك التعليمات في متناول الآلة ، كما مكنها من تفسير بعض هذه التعليمات بناء على نتائج الحسابات المرحلية .

كانت الأوراق المشرية تخزن في الآلات الحاسبة القديمة على دواليب مسننة صمم كل منها ليأخذ عشرة اوضاع مختلفة . اما اليوم فتحتفظ الآلات الحاسبة الحديثة واجهزة الكمبيوتر بالأعداد في صيغتها الثنائية ضمن صفوف عديدة من الدارات المتكاملة . تقتضي المحافظة على المعلومات ضمن هذه الدارات توفير مصادر دائمة للتيار الكهربائي وبكميات قليلة ، يدمى تخزين المعلومات بهذا الأسلوب ، التخزين السريع الزوال ، لان انقطاع التيار الكهربائي يمحو المعلومات من الذاكرة . يمكننا رفع



الوثوقية من تخزين المعلومات بزيادة الاجراءات الكفيلة بمنع انقطاع او اضطراب التيار الكهربائي .

إن الطراز القديم للذاكرات كان يحافظ على المعلومات رغم انقطاع التيار .. اذ كانت الذاكرة تتألف بشكل رئيسي من مفاتيح حلقيّة تخترقها جملة من الاسلاك الكهربائية ، وكانت تلك المفاتيح توضع في صفوف متوازية ، وتمثل جهة تمغنط الحلقة رقماً ثنائياً معيناً .. إن انقطاع التيار لا يؤثر على تمغنط الحلقات ، لذا تبقى المعلومات كما هي لدى هذا الانقطاع ، اللهم إلا اذا حدث تشويش معين في التيار أدى الى تغيير بعض اتجاهات التمكنط بشكل خاطئ ، مما يتسبب في الاحتفاظ بمعلومات خاطئة . دعيت هذه الذاكرات لدى اختراعها بالذاكرات المركزية .

توصف الذاكرات المركزية وذاكرات الدارات المتكاملة بأنها ذاكرات عشوائية التناول . إذ يمكن استرجاع أي زمرة من الأرقام الثنائية من الذاكرة في جزء من الميكروثانية ( الميكروثانية جزء من مليون من الثانية ) بمجرد تغذية الذاكرة بزمرة أخرى من الأرقام الثنائية هي العنوان من الذاكرة حيث تقبع الزمرة المنشودة . تصنف الأرقام الثنائية عادة في زمرة مكونة من ثمانية أرقام تدعى بايت ، أو ستة عشر رقماً تدعى كلمة .

كانت الأرقام الثنائية تخزن ، في أيام الكمبيوتر الأولى ، على هيئة ثقب في شريط ورقي ، أما الآن فتخزن وفق تشكيلات مغناطيسية بالغة الدقة على اشرطة أو اقراص مغناطيسية . وهكذا نشاهد الكاسيتات الشبيهة بكاسيتات آلات التسجيل في أجهزة الكمبيوتر الصغيرة والشخصية ، اذ توفر هذه الكاسيتات بيئة رخيصة لتخزين المعلومات . يوصف تخزين المعلومات على الاشرطة أو الاقراص المغناطيسية بكونه تسلسلي ، إذ حتى نصل معلومة معينة نرغب بالتعامل معها ، لا بد أن نتجاوز كل ما سبقها من المعلومات . وهكذا فالتخزين التسلسلي ابطأ بكثير من التخزين العشوائي ، وهو يستخدم لخزن كمية كبيرة من

المعلومات ، أو لخزن البرامج والمعلومات التي تنقل وبشكل متكرر الى ذاكرات التناول العشوائي . تستخدم الاشرطة المغناطيسية في حفظ نسخة اضافية من كل البرامج والمعلومات الهامة كإجراء احتياطي في حال إصابة ذاكرة التناول العشوائي او الاقراص المغناطيسية بأعطال قد تؤدي للإساءة الى المعلومات المتوضعة في هذه الاوساط .

تضم أجهزة الكمبيوتر إضافة للذاكرة والتخزين ، وحدات الحساب التي تنفذ كل العمليات الحسابية والمنطقية وتتابع تعدادها . ووحدة التحكم التي تضبط تدفق التعليمات وتنفيذها وكذلك الاتصال بأجهزة الإدخال والإخراج ، كما يمكن ان يضاف الى الكمبيوتر وحدات أخرى لتنفيذ مهمات خاصة كتحويل فورييه وقلب المصفوفات وغيرها .

يتوجب على مستخدم الكمبيوتر الذي يرمي لإجراء عمليات محددة، حتى لو كانت بقصد التسلية ، ان يكتب برنامجاً مفصلاً يتطلع من خلاله الكمبيوتر على ادق التفاصيل المتعلقة بتلك العمليات . كان المبرمجون الأوائل يتولون جهوداً جبارة لتحقيق ذلك ، إذ كما هو معلوم يتعامل الكمبيوتر داخليا مع الأرقام الثنائية ، لذا كان على هؤلاء كتابة البرامج بالترميز الثنائي مباشرة .

إلا أن الكمبيوتر يمكن ان يترجم سلاسل الاحرف والأرقام العشرية الى سلاسل مقابلة من الأرقام الثنائية وفق قواعد معينة . كما يمكن كتابة برامج جزئية تحفظ لتنفيذ مهام جزئية غير ملحوظة في مبنى الكمبيوتر الرئيسي ، مثلاً حساب مساحات نموذجية مطلوبة على الدوام في الأعمال الطبوغرافية . لذا تم تطوير اللغات التجميعية والتي يطلق عليها أيضاً اسم لغات الآلة ، وهي تقع في مرحلة متوسطة بين الترميز الثنائي الذي يتبعه الكمبيوتر في داخله ، وبين لغات البرمجة المتقدمة التي يتعامل مستخدم الكمبيوتر بموجبها مع الكمبيوتر .

عندما يكتب المبرمج برنامجاً بالغة التجميعية ، عليه أن يكتبه في خطوات متتالية ، كما أنه يستطيع تحديد مجموعات الخطوات الجزئية التي على الكمبيوتر اتباع أي منها في حال تحقق شرط ما أو عدم تحققه ، ككون نتيجة ما أكبر أو أصغر أو مساوية لقيمة أخرى . إلا أن الأرقام التي يكتبها في مثل هذا البرنامج هي أرقام عشرية ، كما أن التعليمات بسيطة في شكلها مما يسهل عملية استدكورها ، مثلاً كتليمة CLAR وهي اختصار CLEAR ADD ، أي تليمة وجمع ، ويعني ذلك وضع العدد صفر في المراكم ثم إضافة العدد الموجود في عنوان معين من الذاكرة إلى هذا المراكم .

لا شك أن كتابة البرنامج بلغة الآلة ، أي باللغة التجميعية هي عملية متعبة للغاية . تتسم أجهزة الكمبيوتر بأنها عملية لأن لها أنظمة تشغيل يمكن للكمبيوتر من خلالها وباستخدام عدد بسيط من التعليمات أن يقرأ المعلومات ويطبعها وأن يؤدي وظائف أخرى ، والسبب الرئيسي في ذلك أن برامج الكمبيوتر تكتب عادة بلغات البرمجة المتقدمة ، وحتى أنظمة التشغيل تكتب بهذه اللغات .

يزداد عدد لغات البرمجة المتقدمة في كل يوم ، ومن أهم هذه اللغات هي لغة الفورتران FORTRAN ، وهي منحوتة بالأجنبية من كلمتين : FOR من FORMULA أي العلاقة بين بعض المتغيرات ، و TRAN من TRANSLATION أي ترجمة ، وهي من أقدم لغات البرمجة وأكثرها دواماً ، وتستخدم بشكل رئيسي في التطبيقات العلمية ، وكمثال على تليمة وفق هذه اللغة ، نورد التليمة التالية :

IF Z < 80 GOTO 7

ويعني ذلك أنه إذا كانت قيمة المتغير Z أقل من 80 ، فعلى الكمبيوتر أن يترك التنفيذ المتسلسل لتعليمات البرنامج وأن يقفز إلى الموقع من البرنامج المحاذي للرقم 7 . أما إذا كان Z أكبر أو يساوي الـ 80 فيتابع الكمبيوتر تنفيذ البرنامج وفق التسلسل الطبيعي لتعليماته .

تعتبر لغة الباسيك أبسط من لغة الفورتران ، لذا فهي أوسع انتشاراً . أما لغة البرمجة المسماة بالأجنبية C فتستخدم بشكل رئيسي في كتابة أنظمة التشغيل والحسابات العددية . واقع الأمر أن لغات البرمجة تجنح نحو البساطة عندما تصمم لتحقيق أغراض معينة كالحسابات العددية أو معالجة النصوص اللغوية وكذلك تمثيل الجمل الكهربائية أو الميكانيكية أو الاقتصادية . تقاس البساطة هنا بزم من تشغيل الكمبيوتر اللازم لإدناء إحدى هذه المهمات .

يحوّل البرنامج من صيغته المكتوبة بإحدى لغات البرمجة المتقدمة الى لغة الآلة باستخدام نظام اضافي يسمى المترجم وهو ينفذ هذا التحويل على مجمل البرنامج دفعة واحدة ، وهناك نظام من نوع آخر يحول البرنامج سطراً بعد سطر ، يطلق على هذا النظام اسم المفسر والمترجمات أكثر فعالية وشيوعاً . ينصاحب إدخال البرنامج الى الكمبيوتر تشغيل برامج أخرى تجهز بها أجهزة الكمبيوتر بشكل مسبق ومهمتها تصحيح أخطاء الإدخال دون الحاجة لاعادة إدخال كامل التعليمة التي حصل فيها الخطأ .

ينتشر تعلم البرمجة اليوم في كل الاوساط بدءاً من الأطفال المدارس الابتدائية حتى طلاب الجامعات مروراً بالمراحل الثانوية ، كما تشترط كل الجامعات على المتقدمين للحصول على شهادة الدكتوراه بمختلف الفروع ، أن يلموا إلماماً جيداً بالكمبيوتر والبرمجة .

يدخل استخدام الكمبيوتر قطاعات جديدة من الحياة في كل يوم ، كما أصبح جزءاً لا يتجزأ من قطاعات أخرى كفضاء الفضاء وصنع السيارات ومتابعة عمل المصانع الكيميائية وجرد المستودعات وحجز الأماكن في الفنادق ومكاتب السفريات وتشكيل الطيوف الثلاثية الأبعاد وإخراج الأفلام السينمائية ولعب المباريات وقراءة النصوص وتأليف الأعمال الموسيقية السيئة بالطبع والخالية من أي مضمون انساني . وأعداد أخرى من التطبيقات يضيق المجال عن ذكرها هنا . استطاعت تكنولوجيا الدارات المتكاملة توسيع قاعدة الانتاج لأجهزة الكمبيوتر لدرجة دخل معها الكمبيوتر كل بيت وأصبح وسيلة ناجعة للتسلية .

تتسم علوم البرمجة بسهولة تعلمها حتى من قبل الأطفال ، إلا أن أعداد البرامج الهادفة لحل مشاكل معينة هي مهمة صعبة للغاية ، وتزداد صعوبة هذه المهمة كلما كان الكمبيوتر أصغر حجماً .

تنفق اليوم أموال طائلة لأعداد البرامج الطويلة والمعقدة ، ربما أكثر مما ينفق على تحسين الأجهزة ذاتها . يستطيع مبرمج حلاق إعداد برنامج قصير ينفذ وظائف معينة بينما قد يتعثر آخرون في أعداد برنامج مماثل . ويكاد يكون معيار استخدام الكمبيوتر وجود المبرمج الجيد قبل وجود الكمبيوتر الجيد ، والآن فر أعداد كافية من المبرمجين المهرة لتغطية الاحتياجات الواسعة لاستخدام الكمبيوتر في مختلف المجالات .

ورغم ذلك فقد فشل أربع المبرمجين في جعل الكمبيوتر ينفذ أعمالاً محددة . يقوم الكمبيوتر بكل ما يطلب منه ، بشكل أدق لا يستطيع الكمبيوتر القيام بوظائف لا يفهم المبرمج أصلاً فحواها وكل تفاصيلها تستغرق الحسابات الإلكترونية في كثير من الأحيان وقتاً طويلاً وتكلف مبالغ كبيرة ، ولكن في كثير من الأحيان نجد أنفسنا عاجزين عن استخدام الكمبيوتر لمهمة معينة . أما عن أهم المشاكل التي لم نستطع حلها حتى الآن باستخدام الكمبيوتر فهي في واقع الأمر كثيرة ونعد منها : طباعة الكلام المنطوق والترجمة من لغة لأخرى وبرهان نظريات رياضية متقدمة وتأليف موسيقى ممتعة .

سمى الكثيرون لحل بعض أو كل المشاكل التي أشرنا إليها ، وقد أدى ذلك إلى بروز أبحاث جديدة وهامة تتعلق بتفاصيل هذه المشاكل وما يترتب عليها ، كتمييز الأحرف المكتوبة ، بناء اللغة ، استراتيجيات الألعاب ، أسس التأليف الموسيقي ، ونظريات البرهان الرياضي .

أدى التصدي لحل المشاكل المعقدة وغير العادية على الكمبيوتر إلى تعميق فهمنا لعملية الإدراك . وهكذا إذا تحدث أحد العلماء المعاصرين عن أحاطته بالسلوك الإنساني في ظروف معينة أو علمه بطريقة حل مسألة رياضية أو منطقية معينة ، فما يحدث في أغلب الأحيان هو أن يحاول

ذلك العالم أثبات ما ذهب اليه بتصميم برنامج للكمبيوتر يمثل السلوك المعنى أو يعطي تفاصيل البرهان المنشود. أما إذا لم يستطع هذا الدارس توظيف الكمبيوتر في أبحاثه ، فسيبقى فهمه لموضوع بحثه غير كامل . أو ربما غير حقيقي ومضللاً .

هل سيتمكن الكمبيوتر من التفكير ؟ لا نستطيع أن نربط معنى محدداً بهذا السؤال إذا لم نفهم أولاً ما نقصده بكلمة تفكير . يعرض مورفن مينسكي ، وهو رياضي متميز له اهتمامات كبيرة في مجال أجهزة الكمبيوتر واستخدامها ، الحوار القصير التالي . يتحدث الناس عن لاعب شطرنج قدير يقلب كل اللاعبين الآخرين بقولهم: « يا له من عبقرى فد ، يا لعظمة المخ الذي يمتلكه ، انه مفكر كبير فعلاً » . يوجه السؤال التالي الى هذا اللاعب : « كيف تستطيع هزم كل خصومه في اللعب » ، فيجيب : « لدي قواعد معينة أطبقها في الانتقال الى اللعبة التالية » . يعلق المستمعون بسخط « إن هذا ليس تفكيراً إطلاقاً ، فنحن نزاء عملية ميكانيكية محضة » .

يرغب مينسكي من ذلك أن يؤكد أن الناس يجنحون الى تعريف التفكير على أنه تلك العمليات التي تستعصي على فهمهم . سأذهب أبعد من ذلك وأقول إن الكثيرين يعتبرون عملية تفكير أي خلط للكلمات الهامة في صيغ إعرابية مقبولة . أعمد في بعض الحالات لحل مشاكل فكرية الطابع رغم انها ميكانيكية في فحواها . على كل حال يبدو أن الفلاسفة والمفكرين سيثابرون على تبني تعريف للتفكير يكون التفكير بمقتضاه كل ما تعجز الآلة عن عمله في مرحلة معينة . لن يسبب هذا التعريف لي أي ازعاج سيما إذا امكن مبهجاً لأصحابه ، وإن كنت اعتقد أنه يستحيل من حيث المبدأ التفريق بين ما يمكن للإنسان عمله وما يمكن بالمقابل للآلة أن تعمله ، حتى عند اعتبار ما طرحه العالم الرياضي البريطاني تيورينغ عام ١٩٣٦ عن لعبة التقليد .

يسند الدور الرئيسي في هذه اللعبة الى باحث يكون على صلة بإنسان وكمبيوتر عن طريق لوحتي أزرار، إلا أنه لا يدري أي اللوحتين

ترتبط بالانسان أو الآلة . يحاول هذا الباحث اكتشاف صلة كل من اللوحتين بطرح الاسئلة ، وقد تمت برمجة الكمبيوتر بهدف خداع الباحث . ان نجاح اللعبة المتجسد بتضليل الباحث تماماً يتجاوز امكانات الكمبيوتر والبرمجة في العصر الحاضر ، ويحتاج ربما لعدة مئات من السنين ، وقد لا يكون من الممكن تحقيقه أبداً .

رأينا ان السيبرنيتيك هو مجال بالغ السعة ، فهو يتضمن نظرية الاتصالات التي افردنا لها كتاباً كاملاً ، كما يتضمن التنبؤ ، والتنعيم البالي الأهمية في التطبيقات الرادارية والعسكرية ، فوفق وينر ، عندما نحاول تحديد الموقع الحقيقي لطائرة سواء في اللحظة الراهنة أو في المستقبل إنما نتعامل في هذه الحالة مع السيبرنيتيك . وكذلك نكون على احتكاك مع السيبرنيتيك عندما نستخدم مرشحاً كهربائياً لفصل الضجيج من تواتر معين عن الإشارة من تواتر مختلف .

تركز انجاز وينر في هذا المجال الواسع ، وكان عمله الكبير النظرية العامة للتنبؤ الخطي حيث يتم التنبؤ بضرب كل معلومة برقم يتناسب عكساً مع قِدَمها ثم جمع النتائج .

اما المكونة الأخرى للسيبرنيتيك فهي التغذية الراجعة السلبية . يعمل الترموستات وفق هذه التغذية عندما يتابع درجة الحرارة في غرفة ويطفئ أو يشعل تبعاً لذلك جهاز تدفئة للحفاظ على درجة حرارة ثابتة في الغرفة ، كذلك شأن الطيارين الآليين عندما يديرون أجهزة الطائرة لتثبيت ارتفاع الطائرة وجهة طيرانها . وأخيراً يستخدم بنو البشر التغذية الراجعة السلبية للتحكم بحركة أيديهم أثناء قيامهم بالأعمال المختلفة .

قد تكون أجهزة التغذية الراجعة السلبية غير مستقرة ، اذ يمكن ان يؤدي الخرج أحياناً لإبعاد السلوك وبشكل كبير عن الهدف المنشود . يعزو وينر الارتجاج لدى الانسان وبعض امراضه الأخرى الى خلل في آلية التغذية الراجعة السلبية لديه .

تستخدم التغذية الراجعة السلبية أيضاً في توفيق شكل إشارة الخرج الكبيرة من مضخم مع إشارة الدخل الصغيرة . لقد كان لهذه التغذية اهميتها القصوى في نظرية الاتصالات قبل ظهور السيبرنيتيك .

ابرز السيبرنيتيك أهمية الأتمتة المتمثلة بالآلات المعقدة كمقاسم الهاتف التي انقضى على ظهورها فترة طويلة ، واجهزة الكمبيوتر التي وضعت في الاستخدام بعد الحرب العالمية الثانية .

إذا كان الأمر كذلك ، فيضم السيبرنيتيك بين جناحيه كل محصلة التكنولوجيا المعاصرة باستثناء انتاج الآليات الضخمة . نجد في السيبرنيتيك المعارف المتعلقة بتنظيم وعمل البيولوجيا الانسانية . وتنصهر في بوتقته كل الأبحاث الحديثة في العالم ، ففي هذه البوتقة تتوضع المشاكل الاجتماعية ، الفلسفية ، وكذلك الأخلاقية .

وهكذا إذا وصفنا انساناً ما بكونه عالم سيبرنيتيك ، فإن ذلك لن يعطينا فكرة محددة عن مجال تخصصه ، إلا إذا كان هذا الانسان عبقرياً شمولياً بشكل استثنائي إذ ليس بالضرورة أن يحيط عالم السيبرنيتيك بكل تفاصيل نظرية المعلومات .

ولحسن الحظ ، فالقليل من العلماء يعتبرون أنفسهم اخصائيي سيبرنيتيك ، إلا إذا استثنينا أحاديث بعضهم لمن يعتبرونهم في حالة فقر بالنسبة لقواعدهم المعلوماتية . وهكذا إذا كان السيبرنيتيك غامضاً وممتداً ، فان ذلك لن يضر كثيراً . ويبقى مصطلح السيبرنيتيك مفيداً جداً ، وهو يضيف بهجة كبيرة للإنسان ، أو لموضوع البحث ، وحتى لكتاب . وهذا ما هدفت اليه هنا ، أن أضيف قليلاً أو ربما كثيراً من البهجة في هذا الكتاب .





## الفصل الثاني عشر

### نظرية المعلومات وعلم النفس

قرأت حول موضوع نظرية المعلومات وعلم النفس أكثر مما أتذكره أو احتاجه لاهتماماتي . وكان معظمه منصباً على ربط مصطلحات جديدة بأفكار قديمة غامضة ، إذ أن الآمال كانت متمحورة حول إمكانية توضيح تلك الأفكار بفعل سحري بمجرد طرح كلمات جديدة .

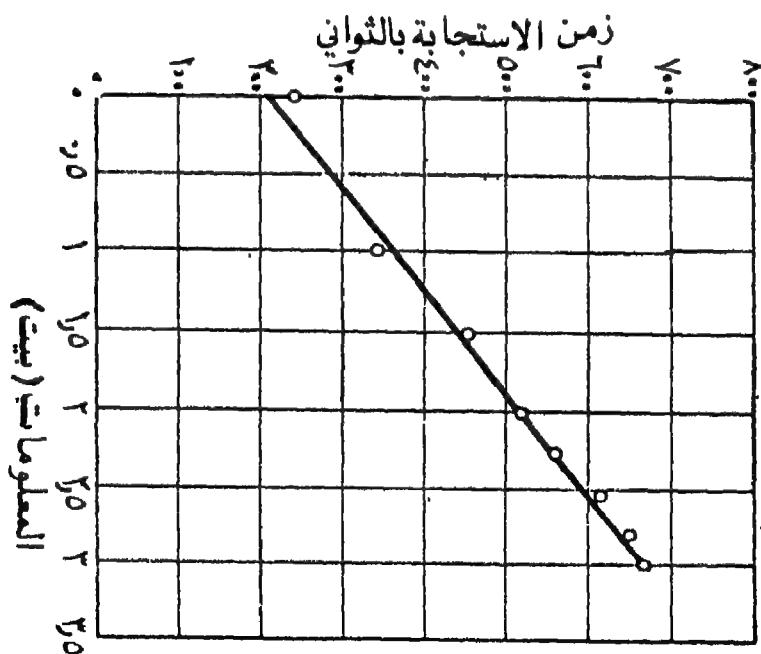
إلا أن بعض تطبيقات نظرية المعلومات في حقل علم النفس التجريبي قيمة . يصعب أن نستنتج من هذه المعلومات أحكاماً نهائية ومؤكدة ، إلا أنها تشكل قاعدة ، أو ربما سبباً ، لتخمينات مثيرة سأحاول في هذا الفصل عرض بعض التجارب البسيطة والمفهومة المرتبطة بنظرية المعلومات وعلم النفس . وقد قمت بانتقائها من خلال خبرتي الشخصية واهتماماتي أشير هنا إلى ضرورة فرض بعض التحفظات لدى تناول أي موضوع واسع وغير واضح المعالم بشكل كامل .

يبدو لي أن رد الفعل الأولي لعلماء النفس تجاه نظرية المعلومات انبثقت عن كون الانتروبي مقياراً شاملاً وامتيازاً لكمية المعلومات ، وعن حقيقة استخدام الكائن الإنساني للمعلومات . يعني ذلك بشكل ما أن صعوبة مهمة معينة ، متمثلة في الزمن اللازم لانجازها ، إنما تتناسب مع كمية المعلومات المتوفرة .

توضح هذه الفكرة في تجارب أجراها واري هايمان وهو عالم نفس تجريبي ونشرها في مجلة علم النفس التجريبي عام ١٩٥٣ سأقتصر هنا على عرض تجربة واحدة من عدة تحارب أجراها هايمان .

توضع عدة أضواء أمام الشخص المختبر . وقد ربط كل ضوء بكلمة وحيدة المقطع تم إبلاغ الشخص المعني عنها تبدأ التجربة بإشارة تنبيه يعقبها وميض أحد الأضواء ثم يطلب من الشخص المختبر ذكر اسم الضوء بالسرعة الممكنة . تقاس الفترة الزمنية الفاصلة بين الوميض ونطق الشخص المختبر باسم الضوء الذي 'نلر' .

كانت التجربة تجري في بعض الأحيان على ثمانية أضواء يومض أحدها بشكل عشوائي على أساس احتمالات متساوية تكافئ هذه الحالة المعلومات المنقولة للشخص المختبر ، والتي تمكنه من تمييز الضوء بشكل كامل ، لع ٨ أو ٣ بيت . كان عدد الأضواء في بعض الحالات ٧ ( ٢٨٨١ بيت ) أو ٦ ( ٢٥٨ بيت ) أو ٥ ( ٢٣٢٠ بيت ) أو ٤ ( ٢ بيت ) أو ٣ ( ١٥٨ بيت ) أو ٢ ( . بيت ) رسم بعد ذلك الخط البياني المثل للزمن الفاصل بين الوميض وذكر اسم الضوء ، أي زمن الاستجابة بدلالة كمية المعلومات مقدرة بالبيت كما في الشكل ١٢ - ١ .



الشكل ( ١٢ - ١ )

يتضح أن هناك وقت استجابة معيناً حتى في حالة استخدام ضوء وحيد ، فالاختيار بين الاضواء اكيد وكمية المعلومات المنقولة في هذه الحالة تساوي الصفر . عندما يزداد عدد الاضواء ، يزداد زمن الاستجابة بشكل مطرد مع كمية المعلومات المنقولة . ان هذا الازدياد المتناسب مع لوغاريتم عدد البدائل كان قد لوحظ من قبل عالم نفس الماني هو ج. ميركيل عام ١٨٨٥ . تبدو هذه النتيجة الحقيقية مؤكدة قابلة للتكرار عن السلوك الانساني .

نلاحظ من الشكل ١,٢ - ١ ان ازدياد زمن الاستجابة هو حوالي ١٥ر. نانية لكل بيت . يذهب بعض علماء النفس غير المتحفظين الى التاكيد بأنه يلزم الانسان حوالي ١٥ر. ثانية للاستجابة لكمية من المعلومات تساوي ١ بيت . وهكذا فالسعة المعلوماتية للانسان هي  $\frac{1}{15}$  بيت في الثانية . هل يعني ذلك أننا قد وضعنا اليد على ثابت عام للادراك أو التفكير الانساني ؟

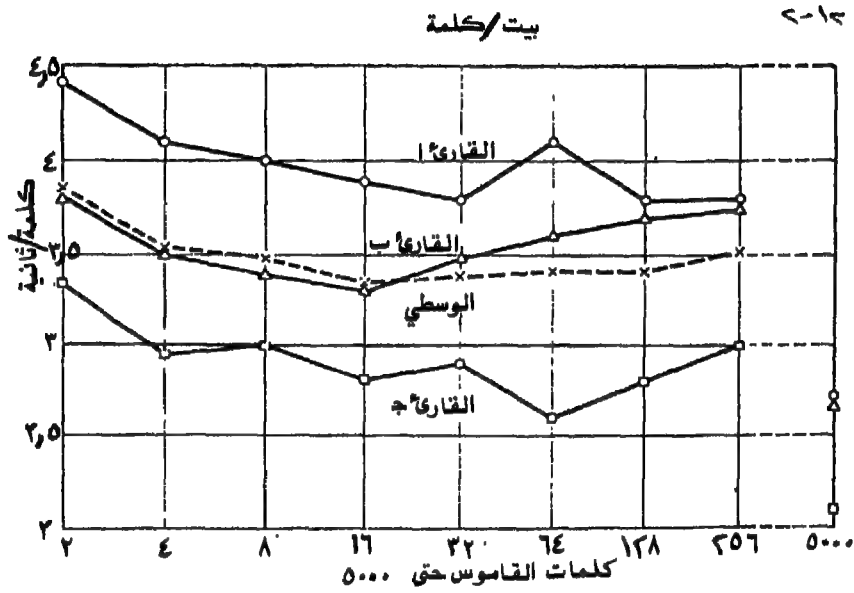
يتناسب ازدياد زمن الاستجابة في تجربة هايمان مع الرتبة في المنبه مقاسة بالبيت . الا ان التجارب المختلفة التي اجراها علماء متميزون افضت الى نتائج متباينة . واكثر من ذلك . فقد أوضح كل من ج. هـ . موبراي و م. ف. رودس عام ١٩٥٩ ، أنه بعد كثير من المرات يتغير اداء الشخص بحيث يصبح زمن الاستجابة مستقلاً عن المحتوى المعلوماتي . يبدو ان الكائنات الانسانية تمتلك طرائق متعددة لتناول المعلومات ، فهناك طريقة تستخدم في التعليم حيث يلعب عدد البدائل دوراً مهماً ، وطريقة أخرى تبرز بعد قطع مراحل كبيرة من عملية التعلم حيث يختزل دور البدائل الى نطاق محدود . بل ويبدو اثر كمية المعلومات في تجربة أخرى محدداً منذ البداية ، حيث يجب على الشخص المختبر ان يضغط مفتاحاً او اكثر من اصل عدة مفاتيح تلمسها اصابعه بمجرد احساسه باهتزاز المفتاح أو المفاتيح المعينة .

وأكثر من ذلك ، إذا كان زمن الاستجابة مساوياً فعلاً لكمية ثابتة يضاف إليها زيادة ما مناسبة للمحتوى المعلوماتي ، فإنه يبقى من غير الأكد أن نحصل على سرعة معلوماتية هامة بقسمة الوقت على عدد واهداث البيت . سنرى أن ذلك سيفضي الى سرع معلوماتية خيالية من خلال التجربة التي سأعرضها فيما يلي .

اجرى هـ كواستلار تجارب مبكرة على السرع المعلوماتية حيث كان على الشخص المختبر أن يعرف سلاسل عشوائية من القطع الموسيقية كما اجري جـ . سـ . برـ . ليكلاندر تجارب على سرعة القراءة والتأشير . بدأت مع جـ . ايـ . كارلين ، وقبل علمنا بهذه الانجازات ، سلسلة مس التجارب حول قراءة قوائم من الكلمات ، وهي تعطي بالمقارنة مع النوعيات الاخرى من التجارب ، أكبر سرعة معلوماتية ملحوظة ، مثلاً أكبر من سرعة ارسال رموز مورس ومن سرعة الطبع بالآلة الكاتبة .

نفرض أن المرسل يختار أبجدية مؤلفة مثلاً من ١٦ كلمة ثم يعتمد الى اعداد قائمة باجراء خيارات عشوائية من بين هذه الكلمات وعلى اساس احتمالات متساوية . تساوي كمية الخيار في هذه الحالة ولكل كلمة لـ ١٦ = ٤ بيت . يثبت الشخص المختبر المعلومات عبر ترجمتها الى شكل جديد هو شكل الخطاب بقراءته القائمة بصوت مرتفع . فإذا كان بإمكانه مثلاً القراءة بسرعة ٤ كلمات في الثانية يكون بإمكانه بث المعلومات بسرعة  $4 \times 16 = 64$  بيت في الثانية .

يوضح الشكل ١٢ - ٢ المعلومات الخاصة بثلاثة اشخاص مختبرين . وقد تم انتقاء الكلمات الخمسمائة الأكثر استخداماً في اللغة الانكليزية . يلاحظ أنه بينما تنخفض سرعة القراءة نوعاً ما بالتحول من القاموس اللغوي ذي الكلمتين الى القاموس ذي الاربع كلمات ( ا أو من ١ الى ٢ بيت لكل كلمة ) ، تبقى هذه السرعة ثابتة تقريباً للقواميس التي تحتوي من ٤ الى ٢٥٦ كلمة ( ا أو من ٢ الى ٨ بيت لكل كلمة ) .



الشكل ١٢ - ٢

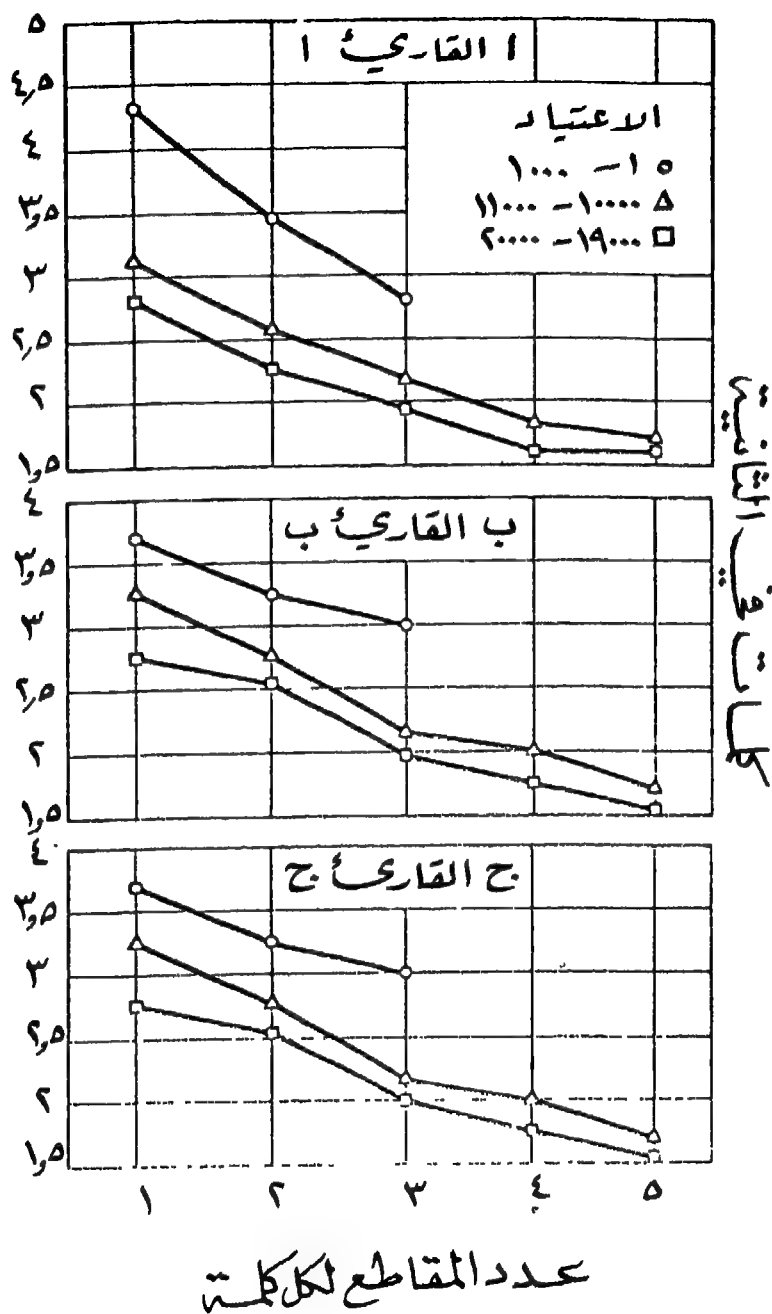
نستذكر الآن طريقة استخراج السرعة المعلوماتية من معلومات كنتك التي عالجها هايمان ، أي ملاحظة الازدياد في الوقت المقابل لازدياد كميات المعلومات المقدرة بالبيت بالنسبة للمنبه . لننقق في الخط الوسطي المتقطع من الشكل ١٢ - ٢ . لا تتناقص سرعة القراءة اطلاقا بالتحول من ٢ بيت للمنبه الى ٨ بيت للمنبه ، أي أن التغير في زمن القراءة لكل كلمة هو صفر ، رغم الازدياد في الكم المعلوماتي بمعدل ٦ بيت لكل كلمة إذا قسمنا ٦ على صفر نحصل على سرعة معلوماتية تساوي الا لا نهاية طبعاً هذا مضحك ، ولكنه لا يبقى كذلك في حالة استنتاج السرعة بطريقة هايمان أي بقسمة ازدياد الكم المعلوماتي مقدراً بالبيت على زيادة زمن الاستجابة .

نستنتج مباشرة من الشكل ١٢ - ٢ ان القارئ ٢ يقرأ الكلمات المؤلفة من ٨ بيت بسرعة ٣٨ في الثانية ، وهكذا فهو يبت المعلومات بسرعة  $8 \times 38 = 304$  في الثانية . واكثر من ذلك ، عندما يتم اختيار كلمات القائمة وبشكل عشوائي من قاموس يضم ٥٠٠٠ كلمة ( ١٢٣ بيت لكل كلمة ) ، فانه عند ذلك سيقرا بسرعة ٢٧ في الثانية محققا سرعة معلوماتية اكبر هي ٣٣ بيت في الثانية .

يتضح انه لا توجد سرعة معلوماتية وحيدة يمكن ربطها باداء الكائن البشري ، اذ ان باستطاعة هذا الكائن بث المعلومات ( وكما سنرى فيما بعد الاستجابة لها او تذكرها ) في شروط معينة بشكل افضل من حالة شروط اخرى . واحسن صورة يمكننا ان نكونها عن الانسان انه قناة او جهاز ناقل للمعلومات له خصائص وقدرات محددة . الا انه جهاز في منتهى المرونة اذ بإمكانه تناول المعلومات باشكال عدة واحسن ما يكون عليه هذا التناول في حالة كون المعلومات مرمزة بشكل مناسب لتقابلاته .

ما هي هذه انقاليات ؟ نقرأ من الشكل ١٢ - ٢ ان الانسان يبطيء بكميات طفيفة لدى ازدياد التعقيد ، فهو يستطيع قراءة قائمة من الكلمات مختارة بشكل عشوائي من ابجدية فيها ٢٥٦ كلمة تقريبا بنفس السرعة في حالة ابجدية فيها ٤ كلمات فقط . انه ليس بسرعة الآلات ، ولكي نحسن من ادائه علينا مطالبته بتنفيذ مهمات معقدة . هذا هو ما كان ممكناً ان نتوقعه .

لا ان التعقيد سيبطئه في النهاية ، كما نرى في حالة الابجدية المكونة من ٥٠٠٠ كلمة . ربما ان هناك ابجدية مثلى لكل كلمة فيها عدد من وحدات البيت ، وبحيث ان عدد الكلمات لن يبطيء عملية القراءة بشكل ملحوظ . قمت انا وكارولين ، في محاولة منا لايجاد هذه الابجدية ، بقياس سرعة القراءة بدلالة عدد المقاطع ودلالة الاعتياد اي فيما اذا كانت الكلمة منتقاة من الكلمات الالف الاولى الاكثر شيوعاً او من الكلمات العشرة آلاف الاولى . يوضح الشكل ١٢ - ٣ هذه التجارب .



الشكل ١٢ - ٣

لاحظ انه بينما يؤدي ازدياد عدد المقاطع الى انخفاض سرعة القراءة يؤدي نقص الاعتياد الى نفس النتيجة تقريبا . وهكذا فقد يكون القاموس المعتاد والمكون من الكلمات وحيدة المقطع هو الانسب . استطاع أحد القراء تحقيق سرعة قراءة مساوية لـ ٣٧ كلمة في كل ثانية ، أي ٤٢ بيت في كل ثانية باستخدام قاموس مؤلف من الكلمات الوحيدة والاكثر استخداماً او اعتياداً والبالغ عددها ٢٥٠٠ كلمة ( ٢٥٠٠ كلمة يعني ١١٣ بيت لكل كلمة ) .

تملك الفقرات النثرية المكتظة ، أي تلك النصوص التي تنتقى كلماتها على اساس تكافؤ الاحتمال ودون روابط اعرابية ، سرعة معلوماتية عالية كحالة النصوص غير التقنية . وتساوي الانثروبي في حالتها ١١٨ بيت لكل كلمة وسرعة القراءة ٣٧ كلمة في الثانية والسرعة المعلوماتية المقابلة ٤٤ بيت في الثانية .

اعتقد اننا نستطيع احراز كسب ما بتحسين الابجدية ، إلا ان هذا الكسب سيكون غير ذي أهمية . وعلى كل حال ، اعطت هذه التجارب اعلى سرع معلوماتية امكن الحصول عليها ، وهي سرع صغيرة وفق معايير الاتصالات الكهربائية ، الا انها مع ذلك تمثل عدداً كبيراً من الخيارات النائية ، حوالي ٢٥٠٠ في الدقيقة .

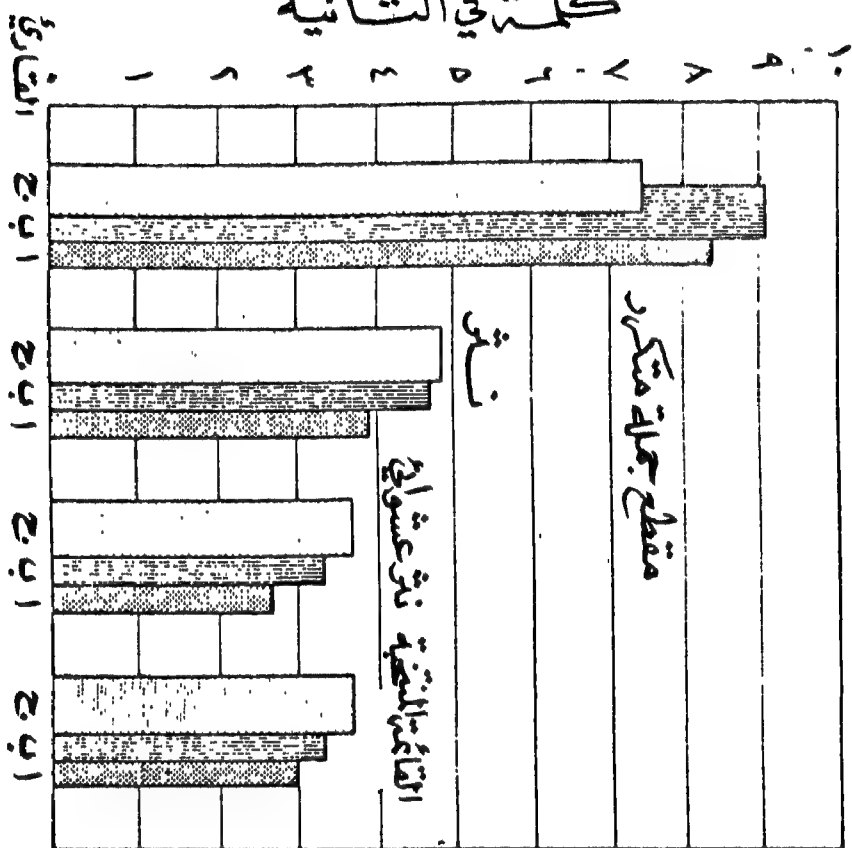
ما هو الشيء الذي يحد من هذه السرعة ؟ هل هو قراءة الكلمات حرفاً بحرف ، اذا كان الامر كذلك ، تعتبر اللغة الصينية احسن لغات العالم لان فيها شارة معينة لكل كلمة ، الا ان الصينيين الذي يقرؤون قوائم عشوائية . من الاحرف الصينية ومقابلاتها من الكلمات الانكليزية يفعلون ذلك بنفس السرعة .

هل يمكن أن تكون القيود على السرعة ميكانيكية الطابع يوضح الشكل ١٢ - ٤ السرع لمهام مختلفة اذ يبين كيف يستطيع أحد الاشخاص استظهار مقطع بضعف سرعته في قراءة مقطع عشوائي التركيب منتقاة



كلماته من قائمة معينة ، واخيرا فسرعه اكبر ما يمكن في قراءة نص منشور  
وهكذا اذا ظهرت بعض المحدودية في القراءة فسيكون عقليا وليس  
ميكانيكيا .

## كلمة في الثانية



الشكل ١٢ - ٤

يبدو حتى الآن اننا لن نستطيع تمييز الانسان بسرعة معلوماتية  
معينة ، اذ بينما تزداد صعوبة مهمة معينة بزيادة محتواها المعلوماتي ،  
فان هذه الصعوبة تتوقف ايضا على قابليات الانسان في مجال معين .  
يتمتع الكائن الانساني بمرونة كبيرة في قابلياته ، الا انه يتعرض لاجهادات  
قوية ويبطئ لدى تصديه للمشاكل الكبيرة وهو بصورة عامة بالغ الكفاءة  
في المجالات المعقدة الا انه بطيء السرعة بشكل عام .

يعتمد تنمية القابليات الانسانية في مجال معين على التجارب المدروسة المخططة بشكل جيد . تشبه هذه العملية ترميز الرسائل من مصدر رسائل معين بهدف تحقيق اكبر سرعة بث للمعلومات عبر قناة ذات ضجيج ، وقد سبق ان بحثنا ذلك في الفصل الثامن ، واسمينا السرعة العظمى عندئذ بسعة القناة . لقد تم انشاء القائمة المنتجة من الكلمات والتي تضمنت الكلمات الـ ٢٥٠٠ الاولى الاكثر شيوعاً والمؤلفة من مقطع واحد ، عبر محاولة هادفة لتحقيق سرعة معلوماتية عالية لقراءة مجموعات عشوائية من الكلمات بصوت مرتفع .

يجدر بنا ان نلاحظ ان انتقاء كلمات النصوص بشكل عشوائي مع الاخذ بعين الاعتبار لاحتمالات ورودها الطبيعية يفضي الى سرعة معلوماتية اكبر بقليل . هل من الممكن ان تكون كلمات لغة معينة وتواتر ورودها قد وفقا على نحو ما مع القابليات الانسانية عبر عملية طويلة من الاختيار اللاواعي المتطور .

رأينا في الفصل الخامس ان احتمال ورود كلمة في النصوص الانكليزية يتناسب مع تواترها ، اي ان الكلمة ذات الترتيب مئة في تواتر ورودها اقل باحتمال ورودها بمئة مرة بالمقارنة مع الكلمة الاكثر شيوعاً . سبق ان اوضح الشكل ٥ - ٢ هذه العلاقة التي اشار اليها للمرة الاولى جورج كينفسلي زيبف وعزاها الى مبدأ الجهد الاقل .

ان قانون زيبف لا يمكن ان يكون صحيحاً بشكله البسيط هذا فقد عرفنا في الفصل الخامس الى ان حساب احتمال ورود الكلمات ما تقدم لا يمكن ان يكون مطلق الصحة ، اذ لو تحقق ذلك لكان مجموع الاحتمالات اكبر من الواحد . لقد جرت محاولة لتعديل واشتقاق وشرح قانون زيبف بشكله الاصلي والابسط على انه توصيفه تقريبي للسلوك الانساني ازاء اللغة ، وقد توصل زيبف الى هذا القانون بشكل تجريبي عبر اختبار احصائيات النصوص الفعلية .

كما قدمنا ، ربط زيف قانونه بمبدأ الجهد الاقل . لقد تركزت الجهود لربط الطاقة الموظفة أو الثمن اللازم لانتاج النصوص مع عدد الاحرف في النصوص . يعتبر اللغويون ان اللغة هي اولا اللغة المنطوقة ، ويبدو من غير المحتمل ان تكون عادات القراءة والكتابة والنطق قد نشأت على هامش عدد الاحرف اللازمة لتكوين الكلمات .

لاحظنا فعلا ان تجارب السرعة المعلوماتية التي اعتبرناها للتو تفضي الى حقيقة مفادها ان سرعة القراءة هي نفسها للمقاطع الصينية والكلمات الانكليزية المقابلة المبينة من الاحرف الهجائية وراينا من خلال الشكل ١٢ - ٣ كيف يؤثر كون الكلمة اعتيادية او دارجة على سرعة القراءة مثلما يؤثر عدد المقاطع .

الا يمكننا اعتبار وقت القراءة كمقياس للجهد ؟ قد يجنح تفكيرنا مثلا انى الاعتقاد باننا نستطيع التعامل مع الكلمات الاكثر شيوعا بسهولة اكبر اي اننا نذكرها ونستخدمها بجهد او ثمن ادنى بالمقارنة مع الكلمات الاقل شيوعا . ربما ان تنظيم الدماغ الانساني يقوم على نوعين من التخزين : الاول يهدف الى الاسترجاع السهل للكلمات ، بينما تستعاد الكلمات في النوع الثاني بصرف جهود كبيرة ويتميز الاول بتغطيته عددا قليلا من الكلمات وحسب . نميل عند هذه المرحلة الى فكرة ان وقت القراءة هو مقياس لسهولة التناول ، او الثمن المطلوب .

لنتخيل اكثر من ذلك ، بان الكائنات الانسانية تستخدم اللغة بطريقة تسمح ببيت المعلومات باكبر كمية ممكنة مقابل ثمن معين ، فاذا اعتبرنا ان هذا الثمن هو زمن النطق ، نستنتج ان الانسان يسعى لنطق اكبر كمية ممكنة من الكلمات خلال زمن محدد .

يؤدي استخدام مبادئ رياضية بسيطة الى برهان علاقة ترتبط بأعلى سرعة معلوماتية ممكنة ، اذ لتحقيق مثل هذه السرعة في حالة رسالة مكونة من كلمات مختارة بشكل عشوائي ، يجب ان يتم هذا الاختيار وفق احتمال قدره  $H(r)$  معطى بالعلاقة :

$$ح (ر) = \frac{ث}{ر}$$

حيث  $ر$  هو زمن قراءة الكلمة ذات الترتيب  $ر$  في قائمة الكلمات الاكثر شيوعا ، و  $ث$  هو ثابت نختاره بشكل يصبح مجموعة الاحتمالات كلها مساويا الواحد . تقول هذه العلاقة ان الكلمات المرتبطة بوقت قراءة طويل ستستخدم بتواتر اقل من تلك ذات وقت القراءة القصير ، وهذه العلاقة صحيحة بقدر رغبتنا في الحصول على سرعة معلوماتية اعظمية .

اذا كان قانون زييف صحيحا ، يجب ان يساوي الاحتمال  $(ر)$  حيث

$$\frac{1}{ر} = ح (ر)$$

$1$  هو ثابت آخر . ينتج من هاتين المساواتين ان :

$$\frac{1}{ر} = \frac{ث}{ر}$$

وبالعودة الى بعض الشروح في الملحق ، نصل من هذه العلاقة الى علاقة اخرى هي :

$$ر = ب + ح$$

هنا ب ، ح ثابتان يحددان باختيار العلاقة بين زمن القراءة  $ر$  والترتيب وفق الاعتقاد  $ر$  ، اذ ان العلاقة الاخيرة يجب ان تكون صحيحة للقراءات التجريبية فيما اذا كان قانون زييف صحيحا وكانت السرعة المعلوماتية تصل حتى نهاية عظمى في حالة الانتقاء العشوائي والمستقل للكلمات وفق الاحتمال الوارد في قانون زييف .

لا تنتقى الكلمات بشكل عشوائي ومستقل عند انشاء النصوص اللغوية الفعلية ، لذا لا نستطيع التاكيد بان الكلمات المنتقاة وفق قانون زييف

ستصل بالسرعة المعلوماتية الى قيمة عظمى . الا انه من المفيد والمتع أن نحاول معرفة مدى صحة التنبؤات القائمة على اساس الاختيار العشوائي والمستقل للكلمات ، خاصة في حالة قراءة النصوص اللغوية .

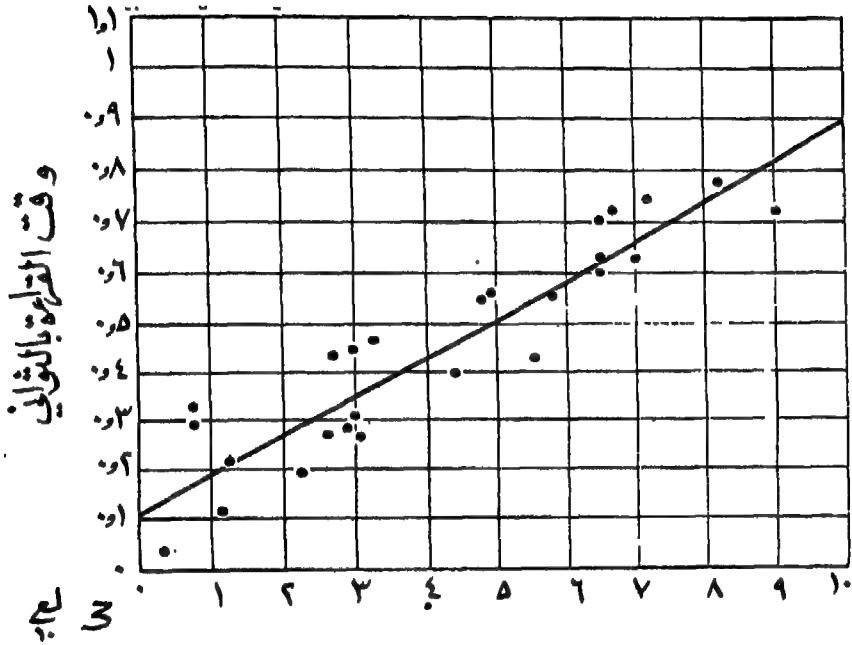
عالج الرياضي بنويت ماند لبروت هذا الموضوع من خلال المعلومات الخاصة بوقت القراءة التي جمعها عالم النفس التجريبي د. هـ. هوز ، وقد عرف ماندلبروت باهتمامه في اللغويات . وقد حاولت بنفسي مقارنة العلاقة الاخيرة مع السلوك الانساني الفعلي بمساعدة المجرب الخبير في مجال علم النفس الفيزيائي ر. ر. ويزس .

هناك صعوبة حقيقية في اجراء مثل هذه المقارنة . يبدو واضحا ان سرعة القراءة تقيّد بإمكانية تمييز الكلمة وليس بنطقها ، اذ يمكن لانسان ما ان ينطق كلمة طويلة معروفة ، بينما يحدق في كلمة أخرى قصيرة وغير معروفة محاولا تمييزها . يمكن الالتفاف حول هذه الصعوبة باجراء عملية توسيط وذلك عبر قياس الزمن الكلي اللازم لنطق ثلاثة كلمات متتالية ومن ثم مقارنة هذا الزمن بالزمن المحسوب من العلاقة الاخيرة .

انجز ريزس هذا العمل ولخص نتائجه في الشكل ١٢ - ٥ . ينطوي الاختبار على محاولة الشخص القراءة باسرع ما يمكن . تمثل العلاقة الاخيرة خطا مستقيما ، اما النقاط التجريبية في الشكل ١٢ - ٥ فهي اكثر انتشارا من ان يجمعها خط مستقيم .

كان علينا ان نتوقع مثل هذا الانتشار اذ اننا قمنا بعملية تجيير التواتر الطبيعي للكلمات في النصوص الفعلية الى خبرة الشخص الموضوع تحت الاختبار ، كما رأينا من الشكل ١٢ - ٣ إمكانية تأثير طول الكلمة على سرعة القراءة ، وأخيرا فقد أهملنا تماما العلاقة بين الكلمات المتتالية .

يشير هذا النوع من التجارب الفضب فعلا ، اذ يمكن أن نستقرئ ما يمكن اجراؤه هذه التجارب ، الا ان كلاً منها يحتاج لوقت طويل ، كما



الشكل ١٢ - ٥

أنا لا ندرى فيما إذا كانت ستتمخض عن نتائج ذات قيمة حدية . ربما أن عبقرياً ما سيكشف عن الحقيقة في أحد الأيام ، إلا أن عالم النفس المتحفظ يجنح لجعل عمله وأعداء بنتائج أكيدة لا جدل حولها .

يوحي العمل السابق ، على الأقل ، بأن الاقتصاد في الجهد يحكم استخدام الكلمة ، وأن الاقتصاد في الجهد يعني الاقتصاد في الوقت . أنا مازلنا في حيرة فيما إذا كان هذا ناتج القابليّات المدربة للتلاؤم مع اللغة أو فيما إذا كانت اللغة نفسها تصبح أكثر تناعماً مع القابليّات الفكرية البشري البشر . ما عساه يكون أمر عدد الكلمات التي نستخدمها ، مثلاً ؟

يقيس بعض الباحثين أحيانا المعجم اللغوي للكاتب بمجموع الكلمات المختلفة في أعماله ، والمعجم اللغوي بشكل أعم لأي إنسان بمجموع الكلمات المختلفة التي يفهمها . إلا أن الكلمات النادرة وغير العادية تشكل في حقيقة الأمر نسبة ضئيلة من مفردات اللغة . يبرز عند هذه المرحلة السؤال التالي : وما هو عدد الكلمات التي تشكل معظم اللغة ؟

قد يذهب البعض للتأكد بأن عدد الكلمات المستخدمة يعكس تعقيد الحياة ، فما نحتاجه من المفردات في مدينة كبيرة لا يفيدنا في قرية صغيرة ولكننا على كل حال نملك حرية الخيار بين استخدام كلمة جديدة للدلالة على شيء ما أو جملة من كلمات شائعة للدلالة على نفس الشيء ، كان نقول مثلا التلفزيون أو الجهاز الذي يرينا ما تبثه أجهزة أخرى بعيدة ، هنا كلمة التلفزيون الأولى تشير إلى شيء معين ولها استخدام متخصص بينما الكلمات في المجلة الأخرى : الجهاز ، الذي ، يرينا ، ما ، تبثه ، أجهزة ، أخرى ، بعيدة ، فلها استخدامات أخرى أيضا .

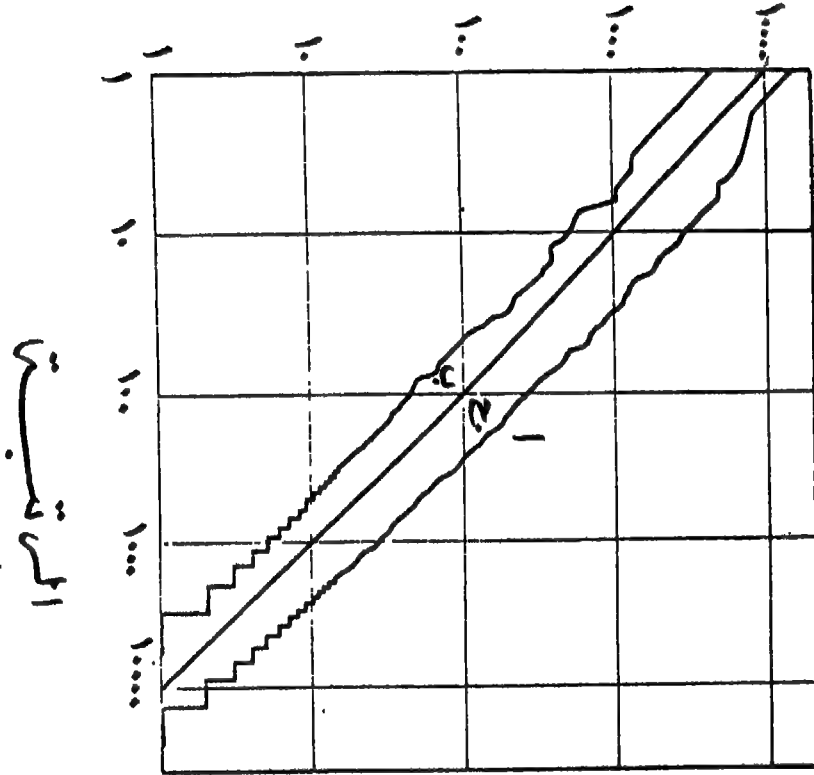
وهكذا نستطيع إنشاء لغة اصطناعية بعدد أكبر أو أقل من الكلمات بالمقارنة مع اللغة الأصلية ونستطيع بواسطتها قول نفس ما نقوله باللغة الأصلية . يمكننا أن نذهب أبعد من ذلك إذا شئنا فنعتبر أبجدية اللغة كلغة مختزلة بحد ذاتها يمكننا أن نترجم إليها أي نص لغوي . .

ربما تجنح كل اللغات لامتلاك معجم أساسي تفرضه قابليات تنظيم الدماغ البشري بأكثر مما يفرضه التعقيد الظاهري للمحيط . يضيف عادة المتميزون والمبدعون من بني البشر إلى هذه اللغة الأساسية عدداً من الكلمات الخاصة وغير المتواترة بقدر ما يرغبون أو يتذكرون .

درس زيبف هذه القضية من خلال المخططات الموضحة لقانونه . يوضح الشكل ١٢ - ٦ علاقة تواتر الكلمة بدلالة درجة شيوعها أي كما أشرنا سابقاً كم هي اعتيادية هذه الكلمة ورتبة امتيادها . يعطي الشكل ثلاثة حالات : الأولى فقرة من عمل أوليس لجيمس جويس ولعدد من

الكلمات مساوٍ لـ ٢٦.٤٣٠ كلمة ، والثانية لـ ٣٩٨٩ كلمة مأخوذة من الصحف، حيث اشير للخالة الاولى بالحرف آ وللحالة الثانية بالحرف ب . اما الحالة الثالثة وهى الخط المستقيم ح فيمثل قانون زيف النظري .

## التواتر



الشكل ١٢ - ٦

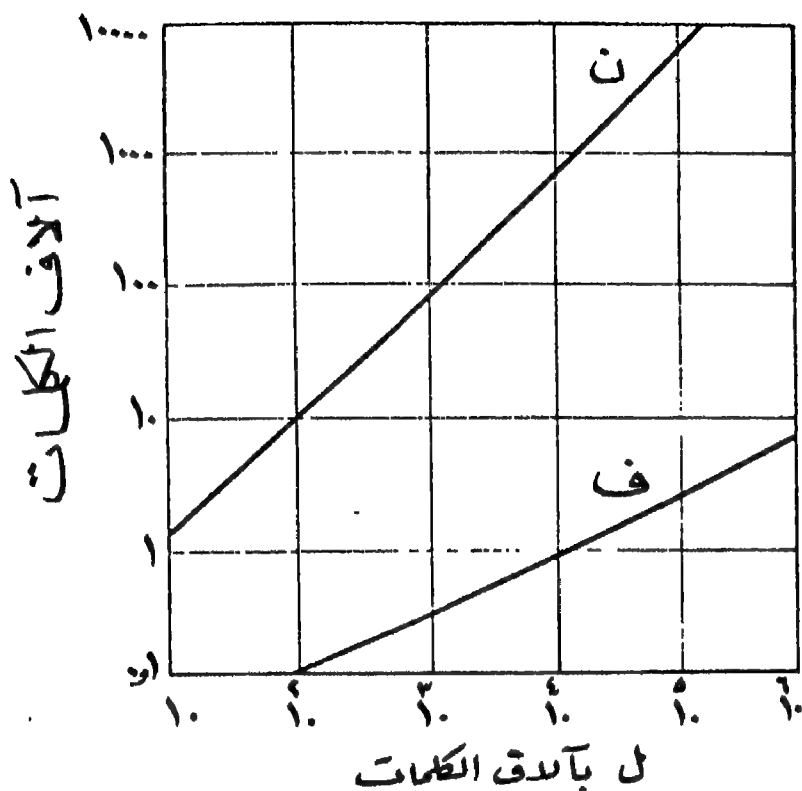
يتحدد ارتفاعا  $T$  و  $B$  بعدد الكلمات في العينة ، في حين ان ميل المنحنيين ، وهو الشق الثاني المهم ، فيرتبط بطول العينة . اما القسم المتدرج في الزاوية اليمنى السفلى من المنحنيين فيعكس حقيقة ورود بعض الكلمات غير المألوفة مرة ربما او مرتين او اكثر ، ولكن ليس ١٥٠ مرة او ٢٦٧ مرة .



عندما نحاول توفيق كل من المنحنيين الى المستقيم ح المائل بزاوية ٥٤٥ ، نجد ان العوامل الهامة في الموضوع تعدى موضوع الميل . نبداً قياس التواترات بالكلمات التي ترد مرة واحدة ، هنا تمثل الزاوية اليمنى السفلى تواتر ورود مساوياً الواحد . كذلك يبدأ محور الرتب بالعدد ١ المقابل لأكثر الكلمات استعمالاً . وهكذا يبدأ كل من المحورين بالعدد ١ ثم يظهر كل منهما نفس التقسيمات أيضاً لتمثيل نفس الازديادات في الأعداد . يتضح من الشكل أن الخط المثل لقانون زيبف يعكس حقيقة مفادها أن عدد الكلمات المختلفة في العينة يجب أن يساوي عدد مرات ورود أكثر الكلمات استخداماً .

نذهب أبعد من ذلك فنقول : إذا كان قانون زيبف صحيحاً في صيفته الأولية هذه فان نصف عدد الكلمات في العينة ستكون مساوية للجذر التربيعي لعدد الكلمات المختلفة في الفقرة المعتمدة . يعطي الشكل ١٢ - ٧ العلاقة بين عدد الكلمات المختلفة و عدد الكلمات ل في الفقرة المعتمدة ، وكذلك العلاقة بين ف عدد الكلمات المكونة لنصف الفقرة وعدد الكلمات فيها ل .

تنعكس هنا محدودية مفردة في معجم المفردات ، اذ تشكل ١٧٠ كلمة نصف فقرة جويس ، كما يؤكد الشكل ١٢ - ٦ نفس الحقيقة بالنسبة للكتابات الصحفية . يؤكد زيبف أن قانونه يصلح للغة الجرمانية القديمة اذا شمل تعداده كل ما يحتل موضع كلمة من النص ، وكذلك مختلف اللهجات الجرمانية ، وان ظهرت بعض الشذوذات في القسم اليساري الأعلى من الخط الممثل للقانون . تجنب المنحنيات المثلة للغة الترويجية لأن تكون أكثر حدة في القسم الأيسر الأسفل بالمقارنة مع القسم الأيسر الأعلى ، كما تعطي لغات أخرى خطأ يساوي ميله ثلاثة أرباع خط زيبف . يعني ذلك عدداً أكبر من الكلمات المختلفة في نص معين ، أي معجماً أكبر . أما في حالة اللغة الصينية ، فيرتفع المنحني فجأة في أعلى اليسار دالاً على مفردات أكثر .



الشكل ١٢ - ٧

ومهما يكن من أمر ، تعكس هذه الدراسة التشابه بين مختلف اللغات ، إذ يتشابه توزيع واحتمال الكلمات أن لم يكن في كل اللغات ففي معظمها ، فربما توائم اللغات نفسها مع فابليات العقل الانساني وتنظيمه ومبناه ، ولربما أن كل انسان يلاحظ ويعبر عن نفس عدد التظاهرات في محيطه ، فانسان الاسكيلو يستخدم مفردات مختلفة للتعبير عن أنواع متباينة من الثلج . على كل حال تشترك كل اللغات في سمة واحدة هي محاولة تصغير الجهد المبذول لتحقيق الاتصالات الانسانية . تؤكد هنا أن هذه النتيجة ليست نهائية بحال من الاحوال .

وجهت انتقادات حادة لعمل زيبف . فأنا مثلاً أعتقد أن من المستحيل أن يلعب طول الفقرة ، وبصرف قانون النظر عن المؤلف ، العامل الرئيسي في تحديد عدد الكلمات المختلفة . طبعاً يشبث قانون زيبف حقيقة هامة وهي أن تواتر ورود الكلمات لا يتغير بطول العينة . يذهب بعضهم إلى التصور بأن صحة قانون زيبف ، أكثر ما تظهر لعينات طولها بحدود ١٢٠٠٠ كلمة ، وأنه في عينات أصغر تتواتر كلمات لا تزد إلا مرة واحدة ، بينما في العينات الأكبر يتضاءل عدد الكلمات وحيدة الورد . وهكذا يبدو من المعقول أن سبب تشابه معجمي جويس والصحف اليومية هو أن الصحف مؤلفة من قبل عدد كبير من الكتاب .

اقتصر تناولنا لقانون زيبف حتى الآن على اعتباره ملائماً للمعلومات التجريبية بشكل تقريبي ومن ثم على التساؤل عما نستطيع فعله بعد ذلك . إلا أن هناك منظوراً آخر لهذا القانون ، إذ يمكن أن نبرهنه على ما هو عليه انطلاقاً من فرضيات بسيطة تتعلق بتوليد النصوص . لقد أعطى عدد من الباحثين مثل هذا البرهان وكان أهم ما قدم في هذا المجال هو عمل الرياضي ماندلبروت الذي اتينا على ذكره ، ويبدو أنه ذهب إلى أبعد من حدود هذا البرهان أيضاً .

يعطي ماندلبروت اشتقاقين مختلفين . يفرض في الأول أن النص ينتج من سلسلة من الأحرف والفراغات المنتقاة بشكل عشوائي وباحتمالات غير متساوية ، كما في التقريب الأول للنصوص اللغوية في الفصل الثالث . يسمح ذلك بعدد لا نهاية له من الكلمات المختلفة المؤلفة من سلاسل من الأحرف مفصولة عن بعضها بسلاسل من الفراغات .

يبين ماندلبروت ، استناداً لهذا الفرض فقط ، أن احتمال ورود هذه الكلمات ح ( ر ) يمكن حسابه من العلاقة :

$$ح ( ر ) = ث \times ( ر + ف ) - ب$$

حيث ر هو ترتيب الكلمة المعنية وفق تصنيف الكلمات الدارجة ، المعتادة أو الأكثر استخداماً . أما ب ، ف فهما ثابتان يمكن حسابهما اذا عرف احتمال كل كلمة وكل فراغ في النص . واخيراً تحدد قيمة ث على أساس جعل مجموع كل الاحتمالات مساوياً للواحد الصحيح .

نلاحظ هنا أنه اذا كان ف صغيراً و ب تقريباً واحد فان العلاقة الأخيرة تقترب من قانون زيبف . وبالمقارنة مع الخط المستقيم لقانون زيبف فان هذه العلاقة تعطي منحنيًا أكثر حدة في أعلى اليسار وأقل انحداراً في أسفل اليمين . بقي أن نقول إن هذا المنحني يلائم معلومات النصوص الفعلية أكثر مما يلائمها قانون زيبف .

لقد تم التأكيد على كل حال بأن طول الكلمات المنتجة بالعملية العشوائية الموصوفة لا تقابل طول الكلمات في النصوص اللغوية الفعلية .

ولا بد من الإشارة أيضاً الى أن اللغات لها مظاهر غير عشوائية ، اذ تقصر الكلمات كلما تواتر استخدامها . هل لنا الحق اذن بأن نتبنى صحة قانون زيبف لمجرد أن الانشاء العشوائي للكلمات يقود الى كلمات تحقق هذا القانون . واقع الامر أننا سنمتلك هذا الحق اذا توفر لنا ما يؤكد بأن انتاج النصوص الفعلية يخضع لعشوائية مشابهة .

يفترض ماندلبروت في اشتقاقه الثاني لقانون زيبف ان تواتر الكلمات يجب أن يصل بالسرعة المعلوماتية الى قيمة عظمى من أجل ثمن معين . يعتبر كحالة بسيطة وخاصة أن لكل حرف ثمناً معيناً وأن ثمن الكلمة ، أي ثمن سلسلة من الأحرف تنتهي بفراغ ، يساوي مجموع ثمن الأحراف المكونة لها . تقود هذه الافتراضات ماندلبروت الى صيغة مماثلة لاشتقاقه الأول وأن كان معنى الثوابت الواردة مختلفاً هذه المرة . فمثلاً يمكن أن يكون الثابت ب أقل من الواحد اذا كان مجموع عدد الكلمات المسموح بها نهائياً .

يمكننا استخدام العلاقة الأخيرة وتوفيقها بانسب شكل مع المعلومات التجريبية وذلك بأن نتوقف عن البحث عن معانٍ ملائمة للثوابت الواردة فيها ، وأن نعطي تلك الثوابت قيمة تحقق هذا التوفيق التجريبي ، وهذا سيكون أجود على الصعيد الفعلي من محاولة الاقتراب من قانون زيف المقابل للقيم :  $b = 1$  ،  $f = 0$  . يبقى على كل حال حتى هذا التطبيق موائماً لأكبر عدد ممكن من الحالات باستثناء عدد قليل منها . وفي بعض الاشتقاقات اللغوية المعاصرة تكون قيمة  $b$  الأقل من الواحد هي الأنسب .

يقول ماندلبروت أن غنى المعجم اللغوي تمكسه قيمة  $b$  ، فإذا كانت هذه القيمة أكبر من الواحد فإن عدد الكلمات المكررة ينخفض ، وإذا كانت قريبة من الواحد فإن تنوعاً كبيراً من الكلمات يظهر في مجال الاستخدام . ويضيف ماندلبروت أنه ينمو الطفل تتناقص قيمة  $b$  من ١٦ حتى ١٥ أو ربما حتى ١ وإذا كان الطفل هو جيمس جويس نفسه .

تؤكد ملائمة العلاقة الأخيرة للمعلومات التجريبية أكثر من قانون زيف ، وهي تتجاوز الاعتراض المنبثق عن قانون زيف بأن احتمال التمرير إنما يعتمد على طول المينة المجترأة من لنص . لا يعني ذلك بالطبع صحة شتقاق ماندلبروت للعلاقة الأخيرة بشكل مطلق ، إذ من المحتمل أن تكون هناك علاقة رياضية أخرى أكثر تماشياً مع المعلومات التجريبية . ويحتاج الأمر إلى دراسة أعمق للحصول على أجوبة نهائية .

ينطبق قانون زيف على جمل معلوماتية غير تلك المتعلقة باستخدام الكلمات ، مثلاً في حالة عدد سكان مدينة معينة بالمقارنة مع حجم هذه المدينة . وهكذا نجد في المدينة العاشرة في الترتيب من حيث المساحة عشر عدد السكان الموجودين في أكبر مدينة ، وهكذا .

إلا أن هذا الانطباق قد لا يعدو كونه تصادفياً . يخضع مثلاً الجذب الثقالي بين جسمين لقانون عكس المربع ، وكذلك شدة أضواء الشمس على

بمدين مختلفين منها ، الا انه لا يوجد قانون عام يمكن ان يفضي الى هاتين الحالتين الخاصيتين في شروط معينة .

ان قابليتنا لاستقبال ومعالجة المعلومات محدودة اصلا بالامكانيات المتواضعة لجملنا العصبية . ويمثل هذه الحقيقة وقانون ٧ زائد او ناقص ٢ لجورج . . ٢ . ميلز . يذهب هذا القانون الى انه بإمكان كل انسان بعد فترة قصيرة من الملاحظة ان يتذكر ويعيد اسماء عدد من الاشياء المعتادة يساوي من ٥ الى ٩ من هذه الاشياء ، كالارقام العشرية او الثنائية ، الاحرف ، او الكلمات الدارجة .

نعرض صورة ضوئية امام شخص لفترة قصيرة ، ثم نريه عدداً من حبات الفاصولياء السوداء ، فيكون بمقدوره اعلامنا عدد العدد الصحيح حتى ٩ حبات . وهكذا فبإمكان ومضة واحدة نقل عدد من الامكانيات مساو لعشرة ، مثلاً من . وحتى ٩ ، والمعلومات المنقولة في هذه الحالة لع ١٠ = ٣٣ بيت .

اما اذا عرض امام نفس الشخص عدد من الارقام الثنائية فسوف يتذكر منها بشكل صحيح ما مجموعه ٧ ارقام ، اي انه تم نقل كم معلوماتي مساو لـ ٧ بيت .

واذا كانت المادة المعروضة أمامه هي الاحرف الابجدية ، فسيستعيد منها اربعة او خمسة ، ان أي الكم المعلوماتي في هذه الحالة سيساوي  $٥ \times لع ٢٦ = ٢٣ بيت .$

يمكن لنفس الشخص ان يتذكر ثلاثة او اربعة كلمات قصيرة دارجة اي اقل بقليل من ٧ - ٢ = ٥ اذا اختيرت هذه الكلمات من اصل الـ ٥٠٠ كلمة الاكثر شيوعاً ، فتكون كمية المعلومات :  $٣ \times لع ٥٠٠ = ٢٧ بيت .$

وكما في حالة التجارب على سرعة القراءة فإن الربح المترتب على التعقيد الأكبر يتجاوز الضياع الناجم عن الفقرات الأقل ، حيث تزداد المعلومات بازدياد التعقيد .

وهكذا تفضي تجارب سرعة القراءة وقانون ميلر الى نتائج مربكة .  
إذا كان الانسان يتلقى ٢٧ بيت من المعلومات من صورة معينة ، فهل نستطيع بالمقابل بث صورة باستخدام ٢٧ بيت من المعلومات بحيث أن اسقاط تلك الصورة على الشاشة سيظهرها كصورة فعلية معتادة وإذا كان بمقدور الانسان بث ٤ بيت من المعلومات في الثانية كما تؤكد ذلك تجارب سرعة القراءة فهل نتمكن من ارسال صورة تلفزيونية أو صوت بجودة عالية وباستخدام ٤ بيت من المعلومات في الثانية .

اعتقد أن الإجابة في كلا الحالتين هي النفي . ما هو الخطأ إذن ؟  
يكن الخطأ في أننا قسنا ما يخرج عن الانسان لا ما يدخل اليه . ربما أن بإمكان الانسان ملاحظة ٤ بيت من المعلومات الهامة في الثانية إلا أن لديه الخيار الكامل فيما سيلاحظه . فمثلاً يمكن أن يتابع فتاة معينة أو يكتفي بالنظر الى ملابسها ، وربما يلاحظ ما هو أكثر من ذلك إلا أن هذه الملاحظة سرعان ما تتبدد قبل أن يصيغها في توصيف معين .

درس عالما النفس أي . آفرباك و ج . سبرلنغ هذه المشكلة بشكل مشابه ، فقد اسقط كل منهما عدداً كبيراً من الأحرف على شاشة ( ١٦ أو ١٨ حرف ) ، وبعد أقل من ثانية نبها الشخص المختبر بإشارة معينة عن الحرف الذي يجب أن يذكره . إذا استطاع ذلك فلا شك أن كل الأحرف قد انطبعت في داخله لأن الحرف المعني قد انتقي بشكل عشوائي .

تؤكد نتائج هذه التجارب أن ما تخزنه العضوية من المعلومات في جزء من الثانية يتجاوز ٧ + ٢ أو ٧ - ٢ كما ورد في قانون ميلر ، ويبدو أن ٧ + ٢ أو ٧ - ٢ من هذه المعلومات تتحرك الى مخزن دائم مسن

الذاكرة بسرعة بند معلوماتي واحد في كل جزء من مائة جزء من الثانية ،  
أو ما يساوي اقل من عشر الثانية لكل البنود . تستطيع الذاكرة الأخيرة  
هذه تخزين المعلومات لعدد من الثواني . يبدو ان حجم هذه الذاكرة  
هو المسؤول عن قانون الـ  $7 + 2$  أو  $7 - 2$  لميلر .

ان بإمكاننا البحث عن علاقات جديدة بين نظرية المعلومات وعلم  
النفس بشكل مستمر . وقد اخترت من هذا المحيط الواسع بعض  
النقاط القليلة وحسب . وسبق السؤال قائماً : هل حقاً ان نظرية  
المعلومات هامة بهذا القدر بالنسبة لعلم النفس ، او ان هذه النظرية  
تقتصر على تنظيم الممكن ، من حيث المبدأ ، باستخدام واسطة اخرى  
غير نظرية المعلومات . اعتقد شخصياً ان نظرية المعلومات قد زودت علماء  
النفس بمنظور جديد عن عملية الاتصالات وعن مدى تعقيدها وأهميتها  
كما ان هذه النظرية قد حركت علماء النفس ودفعتهم لاعادة تقييم المعلومات  
القديمة والبحث عن معلومات جديدة . ويبدو لي اضافة لذلك انه بينما  
تلعب نظرية الاتصالات الدور الرئيسي في الاتصالات الكهربائية ، تقتصر  
مجال علم النفس على دور جذاب وحسب . وأخيراً تضيف هذه النظرية  
عبارات جديدة ومبهرة في مجالات متعددة .





## الفصل الثالث عشر

### نظرية المعلومات والفن

عندما زار موسيقي معاصرو استاذ الموسيقى منذ عدة سنوات مختبرات بيل ، دهش لسماعه ان كل الاصوات الموسيقية وكل التراكيب الموسيقية يمكن اختزانها الى سلاسل عديدة . اما بالنسبة لعلماء الاتصالات فلم يكن هذا الا من سقط المتاع ، اذ ان استخدام تعديل ترميز النبضات يمكن من تمثيل أي موجة كهربائية او صوتية بسلسلة من عينات من السعة .

يبدو ان علماء الاتصالات قد تنبهوا الى بعض النقاط التي لم تكن لتهم الموسيقي . يلزم للتمثيل الجيد للموسيقى ذات عرض الحزام ١٥,٠٠٠ هـ.فث. استخدام ٣,٠٠,٠٠٠ عينة في كل ثانية لا تقل دقة كل منها عن ١.٠٠ ر. ، وهذا ممكن اذا وظفنا ثلاثة ارقام عشرية او عشرة ارقام ثنائية لتوصيف سعة كل عينة .

يستطيع المؤلف ممارسة حرية الاختيار بين الاصوات بشكل مطلق اذا هو اعتبر ٢١٠,٠٠٠ عدد عشري مكون كل منها من ثلاثة ارقام في كل ثانية . سيسمح له ذلك بالانتقاء بين المؤلفات البالغ طولها حوالي عشرين دقيقة والتي يمكن كتابتها على شكل واحد متنوع بعدد من الاصفار مساو لـ ١.٨ مليون صفر ، وهو عدد كبير للغاية . بكلمة أوضح يستطيع المؤلف ممارسة اختيار مكافئ لـ ٣,٠٠,٠٠٠ بيت في الثانية .

نتحسس هنا بعض الخطأ . فقد سبق وعرضنا الى أن الكائن الانساني لا يستطيع تجاوز سرعة معلوماتية قدرها . ٤ بيت في الثانية مهما اتبع من اساليب كمحاولة القراءة بصوت مرتفع . هذه السرعة اقل بكثير من السرعة التي منحناها للمؤلف الموسيقى .

واكثر من ذلك ، فليس بمقدور الانسان ان يتلقى ويقيم من المعلومات ما يتجاوز . ٤ بيت في اثنائية ، فعندما نصفي لمثل معين نسمع غامضا من الكلام بسرعة متوسطة .

اشرنا الى الحرية والمرونة التي يمتلكها المؤلف في التعبير عن مؤلفه كسلسلة من العينات ، ونضيف ان مثل هذه الحرية تهدر على نطاق واسع ، اذ ان مثل هذه الحرية والمرونة نمكنا المؤلف من انتاج مجموعة من المؤلفات ستبدو للمستمع غير مهمة وغير محبة . ان الضجيج الفاوسي الابيض المحتوي كل التواترات على قدم المساواة هو من وجهة نظر رياضية محصلة التنوع وعدم التوقع . ان اكثر الاصوات اصالة هي اقلها توقعا . الا ان الضجيج الفاوسي الابيض بكل اشكاله له نفس الواقع على الكائن الانساني ، اذ تختفي خصائصه عن احاسيس الانسان الذي يحكم ان ما يسمعه ذي وتيرة واحدة وباهت .

اذا كان حكم الانسان على ما هو شديدة التنوع وقليل التوقع من وجهة النظر الرياضية يتلخص بكونه على وتيرة واحدة ، اذن فما هو الشيء الذي سيجده مستحدا وممتعا . اذا كان الشيء جديدا فيجب ان يكون قابلا للتمييز عما هو قديم ، واذا كانت الاصوات قابلة للتمييز ، فيجب ان تكون مألوفة الى حد ما .

نستطيع ان نجد في اصدقائنا المقربين ما هو مميز في كل منهم بينما لا يكون وضع الغرباء مشابها . يمكننا ان نميز بين الصيني والافريقي بالطبع ، الا اننا سنجد صعوبة بانفة في التمييز بين الصينيين أنفسهم ، وبنفس الطريقة نميز بين الضجيج الفاوسي والموسيقي الرومانسية ، الا أن هذا لا يمنحنا قاعدة واسعة للتنوع ، فكل الضجيج الفاوسي يبدو متماثلا بالنسبة اليها .

تبدو معظم المؤلفات الموسيقية للقرن الثامن عشر متماثلة بالنسبة لعشاق المؤلفين الرومانسيين ، وكذلك يبدو بالنسبة اليهم مؤلف ادوارد غرينغ المسمى : مقطوعة هولبيرغ مماثلاً لموسيقى القرن الثامن عشر وان كان في واقع الامر مشابهاً لها بشكل ظاهري فقط . تبدو موسيقى الكورال من القرن السادس عشر رتيبة وغير مميزة حتى بالنسبة لعشاق القرن الثامن عشر . اعلم ان هذه القاعدة تعمل بشكل معاكس ايضاً اذ ان بعض انصار موتزارت يجدون فردي مما بينما يجد التحمسون لتنوع الموسيقى عند فردي مجرد صخب وضجيج في الموسيقى المعاصرة .

يرغب المؤلف بأن يكون حراً واصيلاً ، الا انه يرغب ايضاً بأن يكون معروفاً . اذا لم يستطع متذوقه التمييز بين أعماله فلن يقبلوا على شراء تلك الاعمال ، وأكثر من ذلك إذا لم يستطيعوا تمييز أعماله عن جملة أعمال المؤلفين الآخرين ، فسيكتفوا عند ذلك بتسجيل واحد كممثل للمجموع .

كيف يستطيع المؤلف اذن جمل مؤلفاته مميزة بالنسبة الى الجمهور؟ ربما بالحفاظ على سرعتها المعلوماتية والانتروبي الخاصة بها ضمن حدود القابلية الانسانية للتمييز . يمكن للمؤلف المذكور تحقيق هدف التمييز ايضاً بتنويعه للانتاج ضمن سرع تكافئ عدد من واحداث البيت في الثانية ، وبذا يتمكن الآخرون من ملاحظة الاختلاف بين أعماله .

هل يعني ذلك أن بإمكان المؤلف الحاسب ، أي نظري المعلومات والمؤلف في نفس الوقت ، انتاج متتالية بسيطة وبطيئة من النوتات الموسيقية المنتقاة بشكل عشوائي . كلا بالطبع ، تماماً كما هي حال الكاتب اذا انتقى سلاسل من الاحرف بشكل عشوائي . ان ما سيفعله المؤلف الموسيقي هو اشادة عمله على واحداث اكبر مالوفة بالنسبة للجمهور من خلال الخبرة المتكونة عبر الاستماع الى المؤلفين الآخرين . وستكون هذه الواحدات مرتبة بشكل يمكن المستمع الى حد ما من توقع اللحن التالي دون وضعه خارج المسار طول الوقت . ربما ان المؤلف

سيحاول مفاجئة المستمع بين حين وآخر ، إلا أنه لن يفعل ذلك على الدوام ، كما أن المؤلف سينجح إلى تقديم ما هو جديد ولكن بمعدلات ضئيلة ، وسيعمل على تعويد المستمع على هذا الجديد ومن ثم تكراره بعد فترة في ثوب مغاير .

يستخدم المؤلف الموسيقى لغة يعرفها المستمع ، تماماً كما هي الحالة في اللغة العادية . إذ ينشأ سلاسل مرتبة من الكلمات الموسيقية وفق قواعد موسيقية إعرابية دقيقة . يمكن أن تكون هذه الكلمات أنغام متألفة أو مدرجة ، أو لحن رئيسي أو تزييني . وسوف تتألف في جمل مكررة بشكل نسيق تنطق بها آلات الأوركسترا . إذا كان المؤلف حلاقاً فسينجح في نقل مشاعره الشخصية المميزة إلى المستمع المرفه . وإذا كان في الحد الأدنى حرفياً فسيأتي مؤلفه معتدلاً ومقبولاً .

لم نأت بجديد حتى الآن ، إذ أن بإمكان حتى أولئك البعيدين عن نظرية المعلومات إعادة ما قلناه في جمل مختلفة . إلا أنه يبدو لي على كل حال أن هذه الحقائق ستكون أكثر أهمية عندما يواجه المؤلفون الموسيقيون وغيرهم من الفنانين التنوع الهائل في المصادر التكنيكية المثيرة والمخيفة نوعاً ما .

سينزعون للوهلة الأولى إلى الاختيار الحر المستند إلى قاعدة قمرية . لقد دهش م. ف. ماثيوز من مختبرات بيل إزاء قدرة الكمبيوتر على خلق أي تشكيل موجي استجابة لبعض التعليمات المفداة إليه ، لذا عمد إلى تصميم برنامج يميز كل نوتة موسيقية على بطاقة معينة وفق شكل موجتها ، زمنها ، خطوطها ، وعلوها . انتقل ماثيوز مدفوعاً بفرح غامر إلى مطالبة الكمبيوتر بإنتاج مقاطع موسيقية لم تعزف وكان ذلك ، ومع أن المقاطع المنتجة كانت بسيطة إلا أنها كانت فوضوية .

يستطيع المؤلفون الكبار من أمثال فارسيه تحريك المشاعر بشكل ونمط معين وذلك عن طريق مزج كل أنواع الأصوات المسجلة والمعدلة

وفق المدرسة الواقعية في الموسيقى . لقد انتجت عدة أعمال موسيقية باستخدام الامكانيات الالكترونية ، الا ان المؤلفين مثلوا يعانون من صعوبات كبيرة عند تخليهم عن المصادر التقليدية .

اذا رغب المؤلف بالحفاظ على جمهوره فما عليه الا تبسيط مؤلفاته وكتابتها بالطرق التقليدية ، كما ان بإمكانه وغيره من المؤلفين تربية وتشقيف الجمهور بحيث يصبح من الممكن تذكر وتمييز المصادر الجديدة لأعمالهم ، أو أن على المؤلف مواجهة خيار آخر ببقائه مغموراً وانتظار الاجيال القادمة بهدف اصدار حكم عادل عليه . على كل حال تبقى هناك خيارات أخرى خاصة اذا كان المؤلف عبقرياً .

هل لدى نظرية المعلومات ما يمكن أن تمنحه الى الفنون ؟ اعتقد ان ليس لديها الا القليل مما هو مهم فعلاً لعرضه باستثناء وجهة نظر وهي وجهة نظر مهمة سنخصص لها ما تبقى من هذا الفصل .

تناولنا اللغة في الفصل الثالث والرابع والثاني عشر . تتألف اللغة من أبجدية أو معجم من الكلمات اضافة لاحكام أو قيود قواعدية تتعلق بكيفية استخدام الكلمات وربطها ببعضها . لقد تعلمنا التمييز بين مظاهر النصوص المتنوعة التي تفرضها القواعد والمعاجم اللغوية وتطرقنا كذلك الى الحرية الفعلية التي يمارسها الكاتب أو الناطق . وتأكدنا أن عنصر الخيار هذا هو المسؤول الوحيد عن القيمة المتوسطة للمعلومات في كل كلمة . وبينما كيف توصل شانون الى حساب هذه القيمة بما يتراوح بين ٣.٣ الى ٧.٢ بيت لكل كلمة . يشكل هذا الخيار أيضاً القاعدة الصلبة التي يتمكن الكاتب أو الناطق بالاستناد اليها من نقل الافكار والمعاني التي يرغبها .

تتسم المعاجم اللغوية بكونها واسعة ، على الرغم مما سبق وأوضحناه في الفصل الثاني عشر من أن عدد قليل من الكلمات فقط يشكل الجزء الأكبر من أي نص . اما القواعد اللغوية فهي من الصعوبة بمكان لدرجة أنها لم تصغ بشكل كامل حتى الآن . ومع ذلك ، يمتلك الكثيرون معاجم لغوية واسعة ويحيطون بالقواعد بشكل يمكنهم من الانشاء اللغوي المتميز .

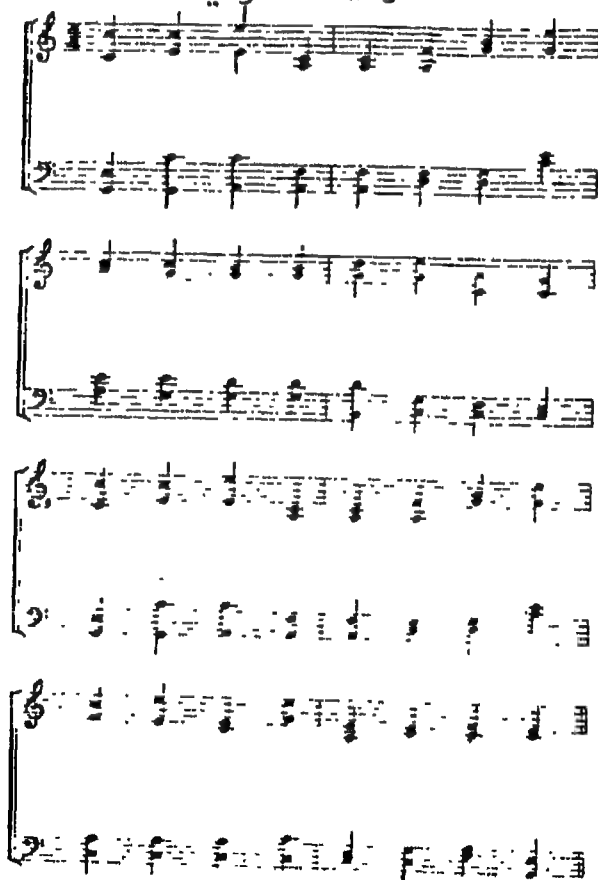
نجد من المعقول أن نفرض وبشكل مماثل معرفة واسعة بالمناصر  
الموسيقية من قبل من يصفون للموسيقى في تأمل وتذوق عاليين . لا يعني  
ذلك أن نطالب مثل هذا المستمع بصياغة القواعد الموسيقية ، مثلما نحجم  
عن مطالبة الكاتب ببناء أحكام القواعد اللغوية ، وكذلك ليس من الضروري  
أن يؤلف الموسيقى وفق القواعد بأكثر مما قد يطلب من أبكم يفهم ما  
يسمع في مجال النطق . ومهما يكن من أمر فسيبقى لديه حد أدنى من  
المعارف الموسيقية يستطيع بواسطتها فهم ما يسمع .

كان هذا هو ما أردته عندما أشرت إلى معرفة لغة الموسيقى أو أسلوب  
الموسيقى ، أي على وجه التحديد معرفة عناصر وأحكام الموسيقى لامة  
أو فترة محددة ، أو مدرسة موسيقية معينة . وسواء إذا كانت الأحكام  
الموسيقية مستندة أو غير مستندة إلى قوانين الفيزياء فإن الالمام بها  
يحتاج إلى سنوات طويلة من التدريب المضي كما هو الأمر في حالة  
اللغة المنطوقة . أن المأنا هذا هو الوحيد الكفيل بتمييز أسلوب  
وخصوصية عمل معين سواء كان أدبياً أو موسيقياً . تبدو الأصوات  
الموسيقية للأذن غير المدربة وكأنها منتقاة من عدد لا نهاية له من الأصوات  
الممكنة وليس فقط من قطاع محدد من الأصوات المعروفة ، وكذلك  
ستبدو لنفس الأذن القواعد الموسيقية ممثلة للخيار والتنوع . وهكذا  
سيهزم التعقيد الموسيقي الجمهور غير المدرب أو الجمهور الذي تعود لغة  
موسيقية مخالفة .

يجب أن نتذكر أن بإمكاننا كتابة جمل ذات معنى حتى لو خالفنا  
القواعد اللغوية . يشبه وضع الموسيقى ذلك إذ أن بإمكاننا تقدير موسيقى  
غريبة نوعاً ما بالنسبة لخبراتنا . وبالمقابل يمكننا كتابة جمل صحيحة  
من حيث القواعد إلا أنها لا تحمل بين ثنائياتها أي معنى محدد ، ساقف  
عند هذه الإمكانيات الأخيرة للحظة . علينا أولاً أن نلاحظ أنه في نفس  
الوقت الذي يمكننا فيه كتابة جمل ذات معنى وصحيحة وفق قواعد  
الأعراب ، إلا أن ذلك غالباً ما يعرضنا لتحديق الآخرين في نقص كفاءتنا  
كوننا كنا واضحين في التعبير .

لن يكون جديداً اذا استغنينا عن المعنى بشكل كامل مع ابقاء معجم معقول وبعض او كل القواعد . وهكذا زود موتزارت الاجيال بفواصل موسيقية في  $\frac{3}{4}$  الزمن اضافة لمجموعة من القواعد . اذا عمدنا الى قذف النرد للحصول على سلسلة من الارقام العشوائية وانتقاء الفواصل وفق القواعد فاننا سنتستطيع تأليف عدد لا نهاية له من مقطوعات الفالس حتى لو افتقرنا الى الخبرة في التأليف الموسيقي ، وستبدو مؤلفاتنا شبيهة بموتزارت غير منظم . يعطي الشكل ١٣ - ١ مثالا في هذا المعرض .

### موسيقى عشوائية



الشكل ١٣ - ١

يقال أن بعض المؤلفين الكبار قاموا بتأليف موسيقى غير منظمة من هذا الطراز ، ومنهم جوزيف هايدن ، ماكسيميليان ستارلر ، وباخ . استخدم جون كيج وهو مؤلف متأخر العمليات العشوائية لانتقاء سلاسل من النوتات الموسيقية .

قمت أنا وزوجة كلود شانون عام ١٩٤٩ ، ودون أن ندرى بالأعمال العشوائية المشار إليها بتأليف موسيقى ابتدائية احصائية أو عشوائية . نظمنا أولاً جدولاً بالانغام المسموحة في المقامات ١ - ٤ من مفتاح سي . لقد تضمن الجدول في الحقيقة انغام المقام ١ فقط إذ استخرجت الانغام الباقية من هذه وفق قواعد محددة . تم إنجاز عدد من المؤلفات باستخدام جداول للاعداد العشوائية وقذف ثلاثة أحجار نرد صنعت خصيصاً .

كانت القاعدة الوحيدة المستخدمة في هذه المؤلفات لربط الانغام مع بعضها ، هي قاعدة ربط النغمين إذا كان لهما نفس اللون في نفس الطبقة . لقد جعل هذا الشرط بقية الانغام تقفز هنا وهناك بشكل غير مرضٍ . يقابل ذلك استخدام الاحتمالات البسيطة وغير الصحيحة في انشاء النصوص كما سبق والمحنا في الفصل الثالث .

وعلى الرغم من التشكيل القصير المدى لهذه المؤلفات البدائية فقد حاولنا أن نجعلها معقولة ومقبولة وقابلة للتذكر ، بل وذات مدى بعيد .

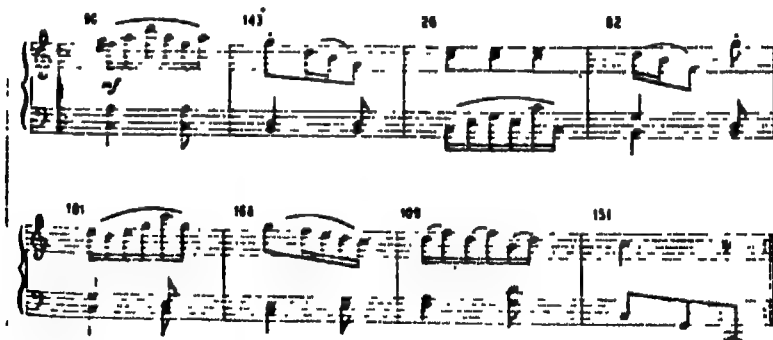
وهكذا فقد تكون كل مؤلف من ثمانية مدرجات بمقياس  $\frac{4}{4}$  ،

وتم التوصل الى المدى البعيد بجعل المدرج ٥ مكرر المدرج ١ والمدرج ٦ مكرر المدرج ٢ ، بينما اختلف المدرجان ٣ و ٤ عن المدرجين ٧ و ٩ . اذن فالمؤلفات كانت من نوع الروندو الابتدائي . كما تم تصنيف الانغام ١ ، ١٦ ، ٣٢ في المقام الاول بينما الانغام ١٥ ، ٣١ أما في المقام الرابع او الخامس . وذلك بهدف اظهار اثر ايقامي .



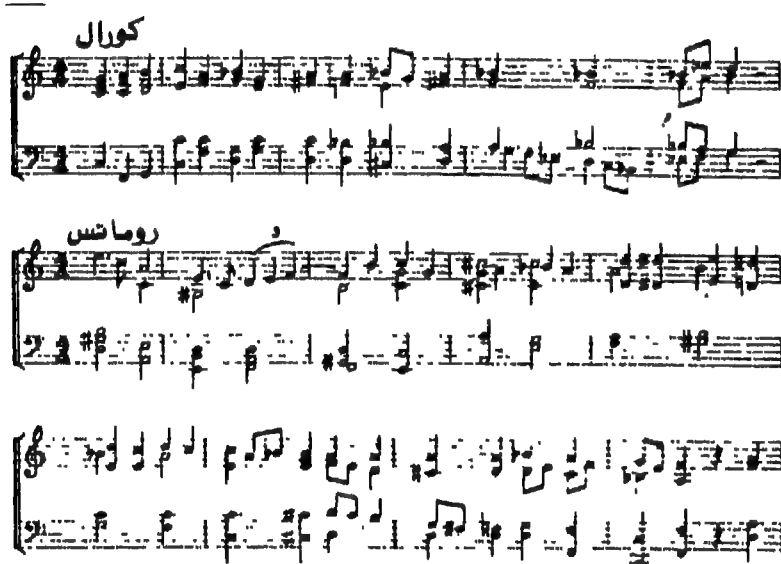
لقد شابهت مؤلفاتنا التراتيل ، على الرغم من انها روندو اصولية .  
يبين الشكل ١٣ - ٢ أحد هذه المؤلفات ، وقد ذهبنا ابعد من ذلك  
بتحديد كلمات لهذه التراتيل ، وكل المؤلفات الاخرى تشبه ذلك الموضع  
في الشكل ١٣ - ٢ وهي بالطبع من تأليف نفس الملحن ، الا انها بعد  
عدد من مرات الاستماع ستبدو مختلفة . ومن الطريف حقاً انني بدأت  
أعلق بهذه الموسيقى بعد سماعي اياها لمرات كثيرة . ولاشك انها ستقع  
بشدة على اذني موسيقي مرهف .

قام دافيد سليبيان ، وهو عالم معلومات سبق ان ذكرناه ، بعمل  
آخر عام ١٩٥١ . فقد استخدم ، باتباع شاتون ، المعلومات الاحصائية  
عن الموسيقى المتوفرة لدى علماء الرياضيات الذين يفتقرون للخلفية  
الموسيقية . عرض على الشخص المختبر ربع علامة ، نصف علامة ، او  
ثلاثة اقسام العلامة من مؤلف موسيقي وطلب منه اضافة نصف علامة  
معقولة ، ثم ابرز المحصلة الى شخص آخر طالباً منه اضافة نصف علامة  
اخرى وهكذا . وسبق ان اخبر هؤلاء الاشخاص بطابع المؤلفات الموسيقية  
المعنية .



الشكل ١٣ - ٢

قدمت في الشكل ١٣ - ٣ نموذجين ، الاول موسيقى كورالية بنيت على اساس اضافة نصف علامة استناداً لنصف العلامة السابق ، والثاني موسيقى رومانسية انشأت باضافة نصف علامة بالاعتماد على الانصاف الثلاثة السابقة . اعجب في الواقع وبشدة كيف ان هذين المؤلفين يظهران كما هما عليه رغم عدم الانسجام والتوافق بين الانغام المتتالية فيهما . ان طابع الموسيقى في هذين العملين ملفت النظر ايضاً ، فعلى ما يظهر كان لدى الرياضيين افكار قليلة عما يناسب الموسيقى الرومانسية وعما يناسب موسيقى الكورال .



### الشكل ١٣ - ٣

توضح تجارب سليبيان مرونة الكائن الانساني واخطاؤه . صحيح ان العمليات العشوائية تبدو متسقة الا انها باهتة وعديمة الروح ، وقد استخدم بعضها في التأليف الموسيقي .

الاّ أنه ليس من شك في قدرة الكمبيوتر على انتاج موسيقى عشوائية تشبه موسيقى مؤلف معين اذا غذي منذ البداية ببعض الاحصائيات المميزة لطابع هذا المؤلف يوضح هذه الامكانية طابع موسيقى الحضانة المبتكر من قبل بينكرتون وتنسوع الطوايع المستحضر من قبل هيلر وايزاكسون والتي سأتعرض لها فيما يلي .

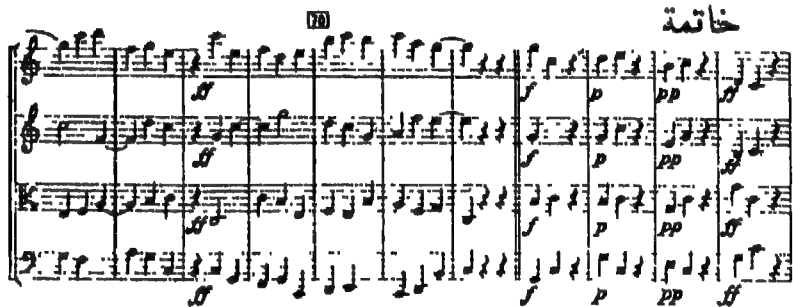
نشر ريتشارد . س . بينكرتون عام ١٩٥٦ في مجلة العلم الامريكي بعض القواعد البسيطة لكتابة الالحن . اوضح بينكرتون كيفية اختيار علامة موسيقية على اساس احتمال ورودها بعد علامة معينة ، ومدى تغير هذه الاحتمالات بتغير الموقع في المدرج الموسيقي . كما حسب الانثروبي لكل علامة باستخدام الاحتمالات المستخرجة من طابع موسيقى الحضانة ووجدتها مساوية لـ ٢٨ بيت ، واعتقد شخصيا ان هذا الرقم اكبر مما يجب . اعتبر بينكرتون آلة متناهية الحالات بامكانها انتاج الحن عادية ، كما فعلت نفس الآلة في الشكل ٣ - ١ عندما انشأت الجمل اللغوية .

استند كل من بروكس ، هوبكنز ، نويمان ، ورايت الى موسيقى التراثيل ونشروا بحثا عام ١٩٥٧ حول الجانب الاحصائي للتأليف الموسيقي .

اعلنت مؤسسة بوروز عام ١٩٥٦ انها عهدت للكمبيوتر بتأليف الموسيقى ، كما اعلن عام ١٩٥٧ ان الدكتور بوليشو والدكتور كلاين استخدموا كمبيوترا كبيرا لتأليف الالحن الموسيقية . وقد ألف جاك . اوينز كلمات لاحد هذه الالحن واذيعت من التلفزيون الامريكي فعلا . وقد حذا الكثيرون هذا الحذو في التأليف الموسيقي .

ومهما يكن من امر فان التأليف الموسيقي الجدي بواسطة الكمبيوتر لم يشاهد النور الاّ على يد هيلر وايزاكسون من جامعة الينوي ، فقد نجح هذان العالمان في صياغة قواعد النوعيات الاولى من اربعة اقسام والتي مكنت الكمبيوتر من اختيار النوتات الموسيقية بشكل عشوائي الاّ اذا خالفت القواعد حيث كان الكمبيوتر يرفضها .

اقتصرت القواعد على العلاقات المباشرة بين ثلاثة نوتات متتالية باستثناء الايقاع الختامي ، لذا تراوحت الموسيقى عبر مجالات واسعة ، وان كانت جيدة ضمن مجالات ضيقة ، لا بل كانت مذهشة أحيانا في تلك المجالات . يوضح الشكل ١٣ - ٤ نموذجا من هذه الموسيقى .



### الشكل ١٣ - ٤

ذهب هيلر وايزاكسون أبعد من ذلك في محاولتهما اثبات قدراتهما على جعل الكمبيوتر يُولف الحاناً ديناميكية ومتناغمة وكذلك على تحقيق التأليف الموسيقي وفق سلاسل ماركوف ، حيث يتم الاختيار المتتالي للنوتات الموسيقية استناداً لتتابع احتمالية محسوبة بدورها من جداول منظمة وفقاً لاعتبارات التنغم الموسيقي . انتج العالمان بذلك خواتم موسيقية جيدة .

لقد جمع هذا العمل الموسيقي وبيع تحت اسم مقطوعة إيلياك لريامي وتري ، وكما أوضحنا فهذا العمل خصائص متميزة في مقاطعة المحلية إلا أنه ضعيف وشديد التراوح إذا أخذ ككل . ولو فرض على العمل نموذج معين أو كررت فيه بعض المقاطع لتحسن بشكل ملحوظ . إن لهذا طابعاً تقريرياً حاسماً تماماً في التكرارات في موسيقى الرونكو ، أو كما هو الأمر في قواعد شومسكي التي شرحناها في الفصل الرابع . يجب أن نتوقع على كل حال استحالة تأليف موسيقى ذي مدى واسع بمجرد استخدام النوتة السابقة أو ربما عدة نوتات سابقة في حساب احتمال النوتة التالية ، فالعلاقة المطلوبة يجب أن تربط أجزاء العمل وليس النوتات المفردة .

يؤكد عمل هيلر وإيزاكسون أن بإمكان الكمبيوتر تأليف بعض الأعمال الموسيقية التي كانت مقصورة على الإنسان فيما مضى . أضف إلى أن بعض المؤلفين غير المهوبين قد يلجأون للكمبيوتر لدى كتابتهم لأعمالهم الموسيقية ، وما يفعله أحدهم هنا هو توجيه التأليف العام وترك مهمة ملء التفاصيل للكمبيوتر . كما أنه يمكن استخدام الكمبيوتر لتجريب قواعد جديدة للتأليف قد يصعب على المؤلف للوهلة الأولى تجربتها والاعتياد عليها .

نسمع في هذه الأيام أن علم السيبرنيتيك سيتحفنا بالآلات يمكنها أن تتعلم . إذا كان بإمكان هذه الآلات أن تتعلم بأسلوب صعب بكل ما تعنيه هذه الكلمة ، فلماذا لا تتعلم ما نرغب منها أن تتعلمه حتى عندما نكون عاجزين عن معرفة أنفسنا . وهكذا إذا فرضنا على الكمبيوتر نظام مكافآت وعقوبات تبعاً لنجاح محاولاته أو فشلها ، نستطيع إذ ذاك وضعه في شروط تمكنه من إنتاج موسيقى إسبانية أو كلاسيكية وفق هوانا . لاشك أن هذه الأفكار مثيرة للغاية ، وقد تبدو عديمة المعنى في عصرنا وربما ستبقى كذلك لعدة مئات قادمة من السنين .

ليست الموسيقى هي كل الفن ، وإن كنت قد بدأت بها فلأنها تعرض بشكل غير عادي بعض الأفكار المشتقة من نظرية المعلومات ، علماً بأن



ومراوحة على لسان احد ابطاله في رواية : الارض القرمزية ، اذ يتحدث هذا البطل فيقول : لا يصل العلم آنسلمو الى نهاية اي قصة ابداً لانه دائماً يتحرك نحو ارض جديدة .

يمكن أن نضيف على النصوص المنشأة بهذا النحو العشوائي سمة النظام الجديد بأن نطلع الاشخاص الذين يضيف احدهم كلمة في كل مرة على عنوان مسبق ومعتمد للنص .

اطلعني الدكتور دونالد. أ. دون من مختبر ستانفورد للالكترونيات على مثال لبناء نص بشكل عشوائي بحيث يضيف احد الاشخاص كلمة في كل مرة بعد اطلاعه على آخر كلمة موجودة في النص ، اضافة لمعرفته بعنوان النص : الرجال والنساء  
وقد أتى النص على النحو التالي :

« أحببت حواء بشدة عاطفية او غير كافي الليلة في أي مكان تموت فيه قبل البلوحة مرة ثانية ومهما جبي أساء » .

اما من تجارب شركة بيل فنعرض النص التالي المنشأ وفق نفس القاعدة السابقة مع فارق إطلاع الشخص على الكلمات الثلاثة الأخيرة بدلاً من اطلاعه على الكلمة الأخيرة فقط . والنص هو :

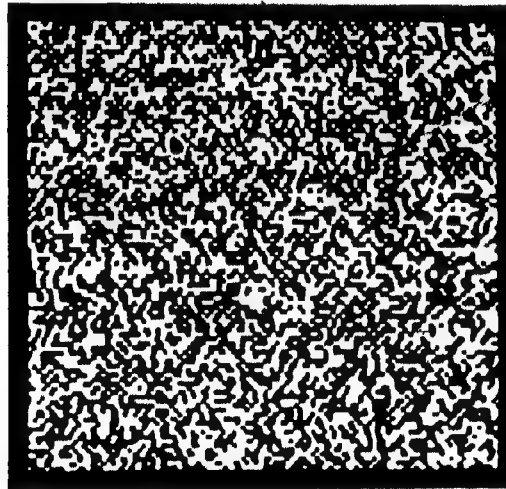
عن الحياة

« الحياة تملك عدة رجال حكماء وعقلاء نادراً ما يلومون البلهاء بشكل سطحي . قد تتمجب لماذا . المشاعر الإنسانية ولكن القبائل البدائية وجدت » .

لا شك ان قراءة هذه النصوص ستترافق بضحكتك السخرية والتهكم ، اذ لا يمكن لإنسان عاقل أن ينشأ مثل هذه النصوص . ينتقي الشعراء قليلو الموهبة كلمات لا ارتباط بينها من أجل تحقيق القافية وهم لا ينتمون عادة أي بيت شعر جيد . ذكرنا ذلك لنؤكد أنه قد تكون العملية العشوائية بعض الحظ في انشاء نصوص جيدة بالمقارنة مع هؤلاء الشعراء .

هل يتمكن الكمبيوتر من انتاج نص واضح الميزات باستخدام  
احكام القواعد وسلاسل الاعداد العشوائية ؟ قد يستطيع إنشاء كلمات  
مضحكة بل ونصوص مضحكة تسبب صدمة للقارئ . نستطيع أن  
نبحر بخيالنا ما شئنا فنتصور كومبيوتر قد جهز بكل عناصر القصة  
البوليسية ، وانصرف الى تأليف قصة بوليسية بعد ذلك ، ما عساها  
تكون تلك القصة . على كل حال ليست هذه إلا تصورات وتخیلات .

يمكن توظيف الفنون البصرية لتوضيح نفس النقاط التي اتينا على  
ذكرها في حالة اللغة والموسيقى . وفعلاً فالتشكيل البصري العشوائي  
هو من وجهة النظر الرياضية الأكثر إدهاشاً والأقل احتمالاً من كل  
التشكيلات البصرية تماماً كالتشكيل العشوائي المكون من الأحرف  
الأبجدية أو الموجات الصوتية : وللأسف فالتشكيل العشوائي هو  
تشكيل باهت ، وتبدو التشكيلات المختلفة بالنسبة للعين الإنسانية  
متطابقة دون فروق واضحة بينها . أعرض في الشكل ١٣ - ٥  
بقعة بيضاء وسوداء موزعة بشكل عشوائي في محاولة لتأكيد هذه الفكرة .



الشكل ١٣ - ٥

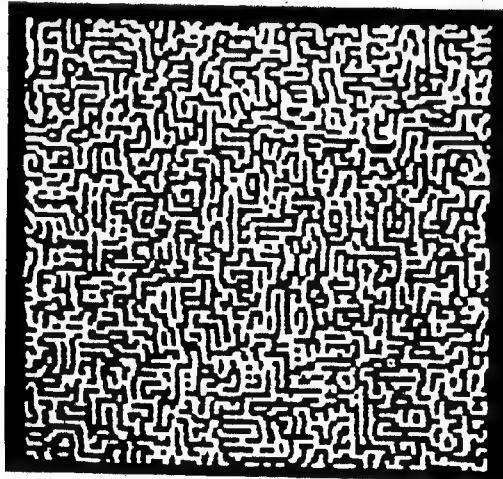


إن التشكيل الأخير في الشكل ١٣ - ٥ هو في واقع الأمر من صنع الكمبيوتر لإنشاء هذا التشكيل ضمن دراساته للإدراك الجسم ومعنى الكمبيوتر ، إذ استطاع بيلا جولز العامل في حقل الإدراك أن يدفع النموذج . ذهب جولسز أبعد من ذلك ببرمجة الكمبيوتر للتخلص من العشوائية في هذا النموذج ما أمكن ، وأشاد فكرته على جمل الكمبيوتر يتفحص وعلى التتابع مجموعات مكونة من أربعة نقاط متمركزة حول نقطة معينة .

إذا طابق المراكز في لونه ( أبيض أو أسود ) أحد الزوجين من النقاط يجري إبدال لونه إلى الأسود إذا كان أبيضاً ، وإلى الأبيض إذا كان أسوداً . يحقق ذلك حذف الأقطار السوداء أو البيضاء إلا عندما يكون أحد الزوجين أبيضاً والآخر أسوداً أو العكس .

إن اعتماد هذه الطريقة في اختزال العشوائية يفضي بنا إلى الشكل ١٣ - ٦ حيث يبدو المظهر العام وقد تحسن فعلاً . حقاً إن عنصر العشوائية مطلوب لتأمين التنوع والمفاجأة ، إلا أن النظام هو الوحيد الكفيل بإحداث البهجة .

يعود استخدام العشوائية والنظام في الفن إلى عهود قديمة . يقدم الميثقال تأثيرات مبهرة باعطاء تشكيلات عشوائية من قطع الزجاج تناظراً سداسي الأوجه .



الشكل ١٣ - ٦

حقق أحد الرسامين منذ عدة سنوات لوحة جديدة باسقاط عدد من الخيوط على قطع سوداء من الشيايب وتثبيتها ومن ثم تطيرها وفق وضعها العشوائي . كما حقق فنان سويسري باستخدام الكمبيوتر لوحات ملونة مزيج من النظام والعشوائية يبيع الكثير منها بأثمان عالية .

زودني كل ذلك برؤية فلسفية اصغرية للفن والتي لن اعزوها الى نظرية المعلومات . وقد وصفت هذه الفلسفة بكونها اصغرية لانها تهمل عن عمد الموهبة والمبقرية وهما العاملان الوحيدان اللذان يجعلان من الانتاج الفني قضية كبيرة .

يسلترم الفن الناجح تقدير الجمهور وموهبة الفنان . يتأثر الناس بعمامل كثيرة غير تلك التي تواجههم عند تأملهم العمل الفني . واذا حاول شخص ما مقاومة فعل العمل الفني ، فلن يحركه شيء وسيبقى بارداً على الدوام ، وعلى العكس اذا اقتادته رغبة المديح فسيمتدح حتى الاعمال الفنية المتوسطة . مثلاً أنا أحب شخصياً أعمال الترائيل الموسيقية التي ألفتها بالاشتراك مع زوجة شاتون . وفي كثير من الاحيان يفضل بعض المؤلفين أعمالهم الضعيفة . أيضاً قد تذهب الجماعات الصغيرة والكبيرة على حد سواء الى تقدير الموضة القصيرة الأمد والتي لا تملك اي ميزات فعلية .

يجنح الجمهور من ضمن أشياء أخرى الى تحسس روح الخلق والابداع واكتشاف المعاناة الذاتية من خلال الأعمال الفنية . يجب على العمل الفني أن يملك انساقاً بالفا حد الكمال كي يجلب الاحترام لصاحبه ويعكس هويته الحقيقية .

نفرض أن فناناً ما استطاع انتاج كل الأعمال العظيمة التي نقبلها اليوم على انها من ابداع اسماء كبيرة ومتباينة الطابع من عالم الفن ، وذلك قبل ولادة كل هؤلاء الفنانين . طبعاً سيدهشنا ذلك ، إلا أن هذا الفنان لن ينتزع اعجابنا بسهولة ، ولن نقف منه موقف الاحترام الذي نلقه من كل عمل على حدة كونه يعكس هوية وذاتية محددين . نستطيع

تميز بيكاسو رغم انه غير مريح . لقد كان حاذقاً في طوابع متعددة ، لذا يصعب إصدار حكم متميز عليه . ما أسهل بالمقابل أن نقدر الفنان مالتيز .

يتوقف تقدير الجمهور للفن على كون الفن مفهوماً من قبل هذا الجمهور . مثلاً النكتة الصينية لن تضحك إلا عدد قليل من الأمريكيين ، كما أن عشرة نكات صينية لن تكون مضحكة أكثر من إضحاك نكتة واحدة . إذا كان للفن أن يعطى حق قدره فيجب أن يصاغ الى درجة ما في نفس لغة الجمهور ، وإلا فمهما انطوى على التنوع ، لن يرى الجمهور فيه إلا الرتابة والتكرار . إن دهشتنا المتكررة لا يمكن أن تتحقق إلا بالمقارنة على خلفية الامتياز وليس بالفوضى العشوائية .

يتبنى بعض الفنانين لغة تعلمها جمهورهم على أيدي أساتذة سابقين ، وكان يوهان براهمز واحداً من هؤلاء ، بينما يذهب البعض الآخر الى تعليم جمهورهم لغة جديدة ، كما فعل الفنانون الانطباعيون . لا شك أن لغة الفن تتغير على الدوام ، ول كبار الفنانين علينا منة في هذا المجال اذ يعلموننا على الدوام لغات جديدة . لا يعني ذلك أن نتنكر لأصالة بعض الفنانين الكبار من أمثال باخ وهاندل ، الذين ألفوا موسيقاهم بلغة الماضي .

إذا كانت اللغة ذات الكلمات الواضحة والعلاقات البينة ضرورية للفن فهي ليست كافية . إن التماثل الميكانيكي باهت ومخيب . وأفضل شخصياً مفاجآت النشر العشوائي على الشعر المضجر لإوين ميرديث . ربما ستجد الإنسانية في الفن العشوائي البديل المنشود لايتل الفن الحرفي في عصر انهيار الفنون .

نكتفي بهذا القدر من نظرية المعلومات والفن .



## الفصل الرابع عشر

### حجوة إلى نظرية الاتصال

انه امر مفرح بكل تأكيد ، ان تساهم فكرة جديدة بحل جملة كبيرة من المشاكل ، إلا ان الفكرة الجديدة لن تستاهل الوقفة عندها ما لم تبين ان لها قيمة عملية مهما كانت تلك القيمة محدودة .

انتقذني احد الباحثين في نظرية المعلومات لانني سبرت في هذا الكتاب إمكانية تطبيق نظرية المعلومات في مجالات اللغة ، علم النفس ، والفن ، فبالنسبة له تبدو العلاقة بين نظرية المعلومات وكل من فروع المعرفة هذه علاقة هامشية وضبابية . لماذا تنتزع القارئ من تطبيقات نظرية المعلومات المثبتة والاكثر اهمية لنجنيح به نحو تطبيقات اخرى غير واضحة المعالم وقليلة الاهمية على الاقل في الوقت الحاضر ؟

يعود ذلك من جهة ، لرغبة عارمة دفعتني لشرح العلاقات الممكنة بين نظرية المعلومات في إطارها المحدد والضيق وفروع أخرى من المعرفة ظهرت علاقتها بهذه النظرية من خلال كتابات الآخرين . ومن جهة أخرى اعتقد ان نظرية المعلومات تساعدنا كي نتحدث بشكل معقول او على الاقل في إبعادنا ما أمكن عن الحدوث غير المعقول ، بصورة خاصة في مجال اللغويات والفن وعلم النفس . ومهما يكن من امر فهناك خطر كبير من الانزلاق وراء التأكيد على هذه القضايا عبر كتاب يتحدث عن نظرية المعلومات .

نؤكد على الخطأ الفاحش الذي نرتكبه اذا اعتقدنا ان أهمية نظرية المعلومات تنبع من ارتباطاتها العريضة مع فروع كثيرة كاللغة ، السيبرنيتيك ، علم النفس ، والفن . ان ترسيخ هذا الاعتقاد ما هو إلا تكرار لأغلاط ارتكبت بحق اكتشافات أخرى مهمة .

وهكذا فقد أحيط عمل نيوتن في عصره بجدل فلسفي ومعرفي ، وأربط لعدة سنوات تالية بشمولية مزعومة أساءت لطبيعته الحقيقية . إلا أن أينشتاين استطاع أن يرى بوضوح أكثر عندما أكد بأن العقل ضعيف ومحدود اذا ما قورن على خلفية مهمته اللانهائية ، ومضى بعد ذلك واصفاً عمل نيوتن بأنه حقق الهدف المنشود المتمثل بولادة علم الميكانيك السماوي والذي تم تأكيده آلاف المرات من قبل نيوتن نفسه ومن تلاه .

وللعادلة نقول ان ميكانيك نيوتن كان فعالاً منذ أيام نيوتن وساهم في حل مشاكل لم يكن ليتخيلها نيوتن ومعاصروه ، إلا أن هذا الميكانيك لم يتمكن من حل كل مشاكل العلم ، كما تصور بعض الفلاسفة المتفائلين .

يبدو لي المضمون الهام الأكيد لنظرية المعلومات بسيطاً وواضحاً . فهي تنطوي على أفكار السرعة المعلوماتية أو انثروبي المصادر المستقرة ، السعة المعلوماتية للأقنية ذات الضجيج وبدون الضجيج ، وكذلك الترميز الفعال للرسائل التي يولدها المصدر بحيث يتحقق البث الخالي من الأخطاء وبسرعة تساوي سعة القناة . أما عالم نظرية المعلومات فهو عالم أنظمة الاتصالات الكهربائية المتضمن للأساليب الذكية في تصميم تلك الأنظمة .

أجد من المناسب في ختام هذا الكتاب أن أبتعد عن الممكنات ( أو المستحيلات ) المحتملة ذات الطابع العام وأن أطرح عوضاً عن ذلك السؤال التالي : ماذا فعل باحثوا نظرية المعلومات وماذا يفعلون أبعد من هذا الكتاب ، بكلمات أوضح ، ماذا فعل هؤلاء الباحثون لتأهيل نظرية المعلومات كعلم متماسك صلب يمكن قبوله أبعد من وضعه الحالي كمجموعة نبوءات تدور حولها المناقشات .

نجد هنا مجالاً واسعاً من الأبحاث يستلزم عرضها كتاباً آخر .  
لذا سيقصر هذا الفصل على عرض موجز لأعمال نظريي المعلومات بعيد  
نشر شانون لبحثه الأول ، كما سيحاول تعريف القارئ بأهداف نظرية  
المعلومات في إطارها الضيق ، وأخيراً سيبحث القارئ على متبعة هذه  
النشاطات بتفصيل أكبر .

سمى باحثوا نظرية المعلومات إلى تطبيق آخر لانتروبي السرعة  
المعلوماتية لمصدر رسائل غير ترميز وبث المعلومات . يرمي الرجال  
الطموحون إلى إعطاء الصورة معنى أكبر ، أما الأكثر تواضعاً فيقنعون  
بأي تطبيق صحيح ذي معنى .

كان التطبيق الوحيد في هذا السياق هو ذاك الذي قدمه ج. ل.  
كيللي الابن عام ١٩٥٦ . يتعلق هذا التطبيق بالمقارنة على أحداث عشوائية  
حيث يملك المراهن معلومات داخلية عن خرج الحدث الذي سيراهن  
عليه . نستطيع أن نتخيل مثلاً أن أحجار النرد قد قدفت للتو ( أو أن  
السباق قد ابتدأ ) وأن المراهن المفضل يعلم ذلك وقد تلقى بعض  
المعلومات من النتائج ، إلا أن الشخص الذي سيراهن معه لا يعرف ذلك  
ويعطي المراهن فراً عادلة على أساس احتمالات النتائج .

يتلقى المراهن معلوماته هذه على شكل وأحداث متتالية من البيت  
أي جملة ودود من طراز نعم أو لا على مجموعة أسئلة مطروحة . يمكن  
مثلاً لمعطي المعلومات أن يخبر عما إذا استقرت قطعة النقد على الطرة  
أو انتقش بإرسال بيت واحدة من المعلومات ، أو يمكن لهذا المعطي أن  
يخفض النتائج الممكنة لرمي حجر النرد من ٦ إلى ٣ بإرسال بيت واحدة  
من المعلومات تعلم المراهن عما إذا كان الوجه السطحي لحجر النرد  
زوجياً أو فردياً .

إن خير وسيلة لشرح عمل كيللي بعد هذه المقدمة هي سرد موجز  
هذا العمل : إذا كانت رموز الدخل لقناة اتصال تمثل إمكانات الخرج  
لحادثة عشوائية يجري الرهان عليها بشكل يتسق مع احتمالاتها ، فإن

بإمكان المقامر الذي يستخدم المعرفة الموفرة له من خلال الرموز المستقبلية أن يزيد أرباحه بشكل أساسي . تساوي السرعة الأساسية العظمى لتنامي أرباح المقامر سرعة بث المعلومات عبر القناة . يمكن تعميم هذه النتيجة لتضمين حالة الاحتمالات الاتفاقية .

وهكذا نصادف حالة تلعب فيها سرعة البث دوراً رئيسياً على الرغم من عدم التطرق لقضية الترميز ضمن الحالة المعتمدة . أما فيما مضى فلم يكن لهذه الكمية من أهمية إلا عبر نظرية لشاتون أكدت أنه باستخدام الترميز المناسب يمكن بث الأرقام الثنائية عبر القناة وفق السرعة المشترط بها وبأقل خطأ ممكن .

وفي لغة الأعداد يساوي عامل ازدياد أرباح المقامر :

$$2^r$$

حيث  $r$  هو عدد مرات المراهنة ،  $r$  هو العدد الوسطي لواحدات البيت من المعلومات التي تبث للمراهن في كل مراهنة .

إذا بدنا هذا التطبيق تافهاً ، فعلى القارئ أن يتأمل حقيقة أنه التفسير الرياضي الوحيد المكتشف إلى جانب التطبيق المعلوماتي الذي قدمنا له فيما مضى من فصول .

يمكن أن يخطر على البال ، لدى تقديم نظرية المعلومات ، إمكانية أخرى لاستخدام نظرية المعلومات غير البحث عن تفسير مستحدث لـ سرعة البث . نشر شاتون عام ١٩٤٩ بحثاً طويلاً بعنوان : « نظرية الاتصالات للأجهزة السرية » . إلا أنه من المشكوك فيه أن يكون هذا البحث قد قدم مساهمة كبيرة لحل الشيفرات ، وأن كان قد هيا ولأول مرة نظرية متكاملة عن الوثائق السرية وتحليلها ويعتبر لذلك مادة غنية للمتخصص في هذا المجال .

ربما أننا لن نستطيع الخوض في تفاصيل هذا البحث ، إلا أنني سأحاول إعطاء فكرة عن محتواه .



ماذا تكون عليه حالة محلل الوثائق السرية عندما يضع يده على رسالة جرى ترميزها بطريقة مجهولة ، انه يجهل أمرين اثنين : الرسالة نفسها وطريقة ترميزها التي يمكن أن نطلق عليها اسم المفتاح .

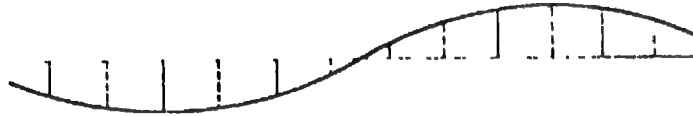
يحدث في بعض الاحيان أن يكون المحلل ملماً بالاساليب العامة للترميز . وكمثال بسيط يمكن أن يفترض المحلل أن الترميز جرى باستبدال كل حرف من الابجدية بحرف آخر وفق قواعد محددة .

يمكن أن تكون الرسالة المعروضة للمحلل طويلة او قصيرة ، وإذا احتوت على ثلاثة احرف فقط مثلاً : الت ، أمكنة تفسيرها بكلمة : نهر ، او كلمة : قمر او أي كلمة أخرى مؤلفة من ثلاثة احرف مختلفة . اذا كبرت الرسالة . فان عدد النصوص الممكنة ينقص بالمقابل ، وإذا كانت الرسالة كبيرة بما فيه الكفاية ، لا يبقى من تفسير لها الا نص واحد مقابل وحسب .

عبر شاتون عن نقص الرتبة هذا المتعلق بالنص الحقيقي الذي جرى ترميزه بشكل يقيم الرسالة المعنية على انها مجرد تغيير في الالتباس . تعطي الرتبة ت ( س ) المعرفة في الفصل الثامن درجة الالتباس في النص الحقيقي الذي تم ترميزه بهدف الوصول الى الرسالة قيد البحث . استطاع شانون اجراء حسابات اثبت بموجبها أن هذه الرتبة تتناقص بازدياد عدد الاحرف في الرسالة . وعندما تصبح هذه الرتبة مساوية للصفر ، فانه لا يبقى الا امكانية واحدة للنص الذي جرى ترميزه ، ويصبح من حيث المبدأ حل الرسالة المعنية ممكناً .

ما هي انواع المشاكل التي واجهت او تواجه الآن نظري المعلومات ؟ تتعلق بعض هذه المشاكل بمسألة أخذ العينات يستخدم نظريو المعلومات تكنيك أخذ العينات بهدف تمثيل اشارة مستمرة متغيرة ذات حزام تواترات محددة بواسطة سلسلة من الاعداد هي في الواقع سمات الاشارة مأخوذة كل  $\left( \frac{1}{2^s} \right)$  ثانية ، حيث س هو عرض حزام الاشارة .

ان مجموعة العينات الممكنة الاشارة محدودة الحزام ليست وحيدة من نوعها ، اذ يمكن اخذ هذه العينات عند لحظات متفاوتة . وهكذا فوق الشكل ١٤ - ١ يمكن ان تكون الخطوط الشاقولية المستمرة هي العينات المنشودة او الخطوط الشاقولية المتقطعة ، او اي خطوط اخرى مأخوذة عند نقاط اخرى . وفي الواقع ليس من الضروري ان تفصل العينات عن بعضها بفترات زمنية متساوية ، بشرط ان تؤخذ ٢ س عينة في كل ثانية .



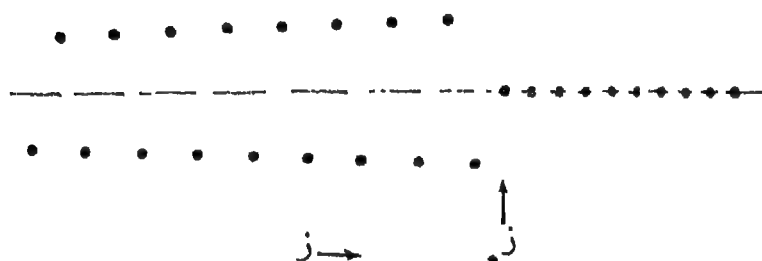
الشكل ١٤ - ١

ان شرط تمثيل الاشارة المحدودة الحزام بشكل وحيد باستخدام ٢ س عينة في كل ثانية هو استخدام كل العينات بدءاً من لحظة لا نهائية في الماضي وحتى لحظة لا نهائية في المستقبل الا اننا قد نحتاج في بعض الاحيان لاعتبار جزء من الاشارة محدودة الحزام ، او اشارة محدودة الحزام معلومة تقريباً باستثناء فترة محددة من الوقت ، ونرغب بتمثيل هذه الاشارة بدلالة العينات .

اول ما يخطر على البال هو السؤال المتعلق بتمثيل اشارة قصيرة او جزء من اشارة بسلسلة متناهية من العينات دون الاخذ بعين الاعتبار للتقنيات السابقة او اللاحقة . للأسف ان اعتبار عدد متناه من العينات لن يحدد اشارة وحيدة محدودة الحزام ، اذ يمكن ان تمر اشارات مختلفة محدودة الحزام عبر هذا العدد المتناهي من لعينات ، واذا كانت الاشارات ذات سمات كبيرة خارج نطاق العينات المعتبرة فان الاشارات ضمن هذا النطاق ستكون مختلفة بالتالي .

صحيح أن هذا قد يبدو فشلاً ، ولكننا نستطيع تحديد عينات معينة متتالية ونصطلح على أن كل العينات السابقة والتالية لهذه المجموعة هي عينات صفيرية بمعنى أن كلا منها تساوي الصفر ، إذ نستطيع أن نتصور أن الإشارة المعتبرة ضمن النطاق المحدد ستفق مع العينات المعتبرة ، بينما ستكون إشارة صفيرية تقريباً حيثما تكون العينات صفيرية .

نفرض على سبيل المثال مجموعة من العينات تصبح صفيرية بعد لحظة ز ، بينما تكون غير صفيرية قبل هذه اللحظة ، كما في الشكل ١٤ - ٢ تمثل هذه العينات إشارة وحيدة محدودة الحزام ، ببساطة لأنها مأخوذة عند كل الأزمنة بدءاً من الماضي وحتى المستقبل . هل ستكون هذه الإشارة صفيرية فعلاً بعد اللحظة ز ؟



الشكل ١٤ - ٢

للأسف ، أثبت هـ . و . بولاك من مختبرات ييل أن هذه النتيجة ليست لازمة . نفرض أننا نتساءل عن الجزء من القدرة الكلية لهذه الإشارة الذي يحمله قسم الموجة الحادث بعد عشرة ثواني أو عشرين دقيقة أو ربما بعد خمسين سنة من اللحظة ز . نتذكر في هذا السياق أن كل العينات صفيرية بعد اللحظة ز .

تتلخص الإجابة المدهشة لهذا التساؤل في أن نصف قدرة الإشارة تقريباً يمكن أن يحمل على القسم من الإشارة الحادث بعد أي لحظة زمنية تنبم بكونها فاصلة بين قيم العينات غير الصفيرية قبلها ، وقيم

العينات الصفراء بعدها . وهكذا فقد تكون الإشارة صفراء عند كل لحظة بعد ز . تؤخذ عندها أي عينة ، وفي نفس الوقت غير صفراء فيما بين هذه العينات .

لا تزال الجهود المبذولة لتمثيل الاشارات المحدودة الطول باستخدام العينات تتعرض عبر عوائق رياضية ، ويعمل الرياضيون ما يستطيعونه لشرح الطريق بين هذه العقبات .

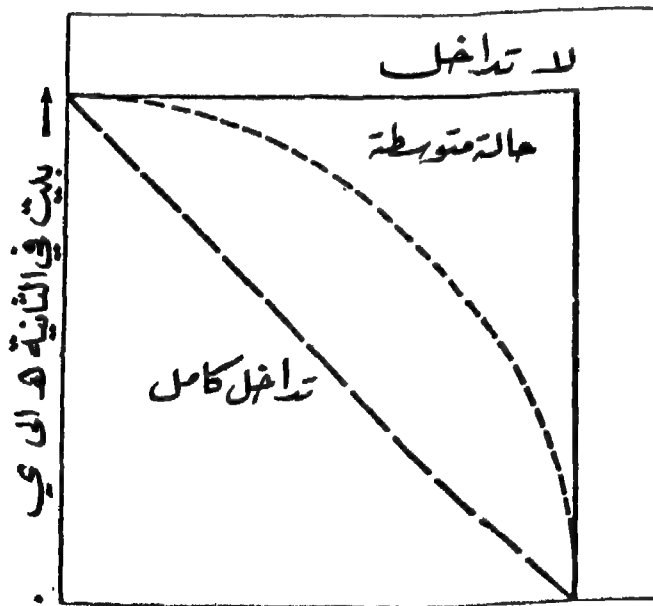
يشير عملاً بولاك وسليبيان الى أن كلا طريقتي أخذ العينات والامواج الجيبية ليستا الطريقتين المناسبين لتمثيل الاشارات المحدودة زمناً ، وقد وظف هذان الرياضيان توابع رياضية أخرى لتحقيق التمثيل المطلوب دعيت بالتوابع الكروية المتطاولة .

يوضح المثال التالي جانباً محيراً من نظرية المعلومات . نفرض أننا نمثل في مبرقة النقطة نبضة موجبة والخط بنبضة سالبة ، ونفرض أن أحداً من محبي الدعبلات عكس الوصلات الكهربائية بحيث يتم استقبال سالبة عندما يتم إرسال نبضة موجبة والعكس بالعكس . تؤكد نظرية المعلومات أن سرعة الإرسال ستبقى نفسها في هذه الحالة لأن هذا العمل لم يقدم أي ريبية إضافية . إلا أننا سنشعر أن ضرراً ما قد حل بنظام الاتصال ، وسيكون هذا الضرر أكبر إذا طبع جهاز الاستقبال حرفاً مغايراً للحرف المرسل وانسحب ذلك على كل الأحرف .

أقض هذا المثال مضجع شاتون طعمد الى صياغة نظرية تفطي الوضع الناسيء عنه ، إذ عرف من خلالها معياراً للأمانة . وهكذا يفرض شاتون عقوبة معينة على استبدال الحرف الصوتي بحرف ساكن وعقوبة أخف على استبدال الحرف الصوتي بحرف صوتي آخر . ثم يعمد الى تقييم الضرر الحادث للرسالة بسبب الأخطاء المتسقة أو الأخطاء العشوائية . إذا كان الضرر ناجماً عن الأخطاء العشوائية لقناة ذات ضجيج ، يوضح شاتون كيفية تصفيره الى حد أدنى ، كما يبين عدد واحداث البيت في كل ثانية اللازمة لبث الإشارة بدرجة معينة من الأمانة .

انجز شانون ايضا عملاً ضخماً فيما يتعلق ببث الرسائل عبر الشبكات التي تتداخل فيها رسالة مع اخرى . ان أبسط أنواع هذا التداخل هو حالة قناة وحيدة تبث عبرها رسالتان باتجاهين متعاكسين بين نقطتين منها ه ، ي . نفرض بهدف التسهيل ان مواصفات عمل القناة هي نفسها في الاتجاهين ه ي ، ي ه .

نقوم برسم الخط البياني الممثل للعلاقة بين سعة القناة في الاتجاه ه ي ، وسعة القناة في الاتجاه ي ه ، وهو الخط المبين في الشكل ١٤ - ٣ نتخيل حالتين بسيطتين ، في الاولى لا يحدث تداخل بين الاشارة المنطلقة من ه الى ي وبين الاشارة المنطلقة من ي الى ه . يتكون الخط البياني الممثل لهذه الحالة من الجزء الافقي المستمر الممثل لسعة القناة من ي الى ه والجزء الشاقولي المستمر لسعة القناة من ه الى ي .



بث في الثانية ي الى ه

الشكل ١٤ - ٣

أو نستطيع ان نتخيل ان ارسالنا عند لحظة معينة سيقصر على أحد الاتجاهين هـ الى ي ، أو ي الى هـ . وهكذا اذا حافظنا على جهة الارسال هـ في ثلث الحالات ، فان الارسال في الاتجاه المعاكس ي هـ سيستغرق ثلثي الحالات الباقية ، وهكذا يجب ان يكون مجموع سمتي القناة في الاتجاهين هـ ي ، ي هـ ثابتا في هذه الحالة والنتيجة هي الخط المتقطع المائل بزاوية ٤٥° في الشكل ١٤ - ٣ .

اما في الحالة المتوسطة حيث يكون هناك شيء من التداخل بين الارسالين في الاتجاهين نحصل على منحني كذاك المتقطع في الشكل ١٤ - ٣ .

لا زالت مشكلة الترميز الفعال الموجه الرئيسي لعمال الباحثين في نظرية المعلومات ، ففي قناة متقطعة يسمى هؤلاء لتصحيح عدد من الاخطاء في سلسلة من الارقام الثنائية المرسل .

يركز هؤلاء الباحثون جهودهم ايضا للحصول على احسن ترميز معلوماتي عبر قناة مستمرة ذات ضجيج . نشر شاتون عام ١٩٥٩ بحثا مطولا توصل فيه الى الحدين الاعلى والادنى لسرع انتشار الاخطاء الطرق ترميز مختلفة التعقيد وذلك في حالة قناة مستمرة ذات ضجيج غاوسي . تفضل الآن الرموز الملتفة ورموز فيتري ويسمى عباقرة الرياضيات الى رموز أجود وأرخص .

ولا يقتصر البحث عن طرائق جديدة للترميز على هؤلاء الباحثين ، بل يتعداهم الى المهندسين الساعين لتحسين الاتصالات الكهربائية والذين يجربون ترميز الاشارات التلفزيونية والصوتية بأقل عدد ممكن من الارقام الثنائية ، وقد سبق ان تعرضنا لمحاولاتهم في الفصل السابع . تزداد أهمية الترميز الفعال خاصة لان الارسال الرقمي للاشارات ( كما في تعديل ترميز النبضات ) أخذ يحل تدريجيا محل الاتصالات التماثلية ، وسترداد تلك الأهمية أكثر وأكثر عندما تم طريقة الترميز بهدف الحفاظ على السرية والخصوصية اذ ان انجع الوسائل للحفاظ على السرية هي الوسائل الرقمية .

يسمى المهندسون أيضا لابتداع طرائق بسيطة وفعالة لتصحيح الأخطاء خاصة تلك التي تحدث أثناء إرسال الإشارات الرقمية عبر الدارات الهاتفية يزداد استخدام أسلوب الإرسال الرقمي في كل المجالات العسكرية والمدنية . تمتد خطوط الهاتف تقريبا في كل مكان ، وللمحافظة على سرعة بث جيدة للمعلومات نستخدم دارات صوتية . هنا يمكن إصلاح الأخطاء باكتشافها وإعادة بثها ، إلا أن استخدام الترميز لإصلاح الأخطاء هو أمر مفضل أيضا .

تفرض بعض الظروف الخاصة طرقا معينة للتعديل ، من هذه الظروف حالة الراديو المتحرك ، ففي المدن تصل الإشارات إلى السيارات بعد ارتدادها من مجموعة من الابنية وهكذا يتم استقبال نبضة قصيرة كمسحة من النبضات التي ارتطحت عبر مسافات مختلفة وفي مسارات متباينة . تحتاج هذه الحالة إلى دراسة متأنية لاكتشاف أحسن السبل في استخدام حزام من التواترات بالغ العرض بهدف تحسين البث .

تطرح الاتصالات العسكرية ، خاصة في مواجهة التشويش ، عددا من المشاكل الهامة .

قد يعتقد البعض أن كل هذا ليس إلا ترفا هندسيا لا يقارن بالافاق الفلسفية التي تفتحها أمامنا نظرية المعلومات . هل يمكن للفهم المستند إلى الاعلام ، أو للتقدير المحبب للطبيعة ، وكذلك للمزايا والفروق بين الرسامين الانطباعيين الفرنسيين أو الواقعيين الهولنديين ، من أن يكون ذي معنى كما في حالة المواجهة المفاجأة لفن جديد وغريب كالفن الياباني .

إلا أن الناقد الفني الذي يتابع باخلاص كل التفاصيل لا شك سيحوز في النهاية بصيرة وقيما سليمة مثلما سيكون عليه حال هاوي الفنون المرهف الحس . يبدو أن هناك أحكاما تثقيفية تفرض تقييم انتاج معين لما هو عليه وليس بسبب تأثيره على عقول الناس غير المسلمين به . أتمنى أن يكون لهذا الكتاب جوانبه المثيرة ، إلا أنني لا أبغي من وراءه تكوين وجهة نظر لدى القارئ عن نظرية المعلومات تختلف عن تلك التي يتمسك بها العاملون ذوو الخبرة في هذه النظرية ، إذ من الأفضل أن أنهي هذا الكتاب في أجواء متماسكة رزينة .





## ملحوظات رياضية

يملك القارئ ملء حريته في استخدام أو عدم استخدام الرياضيات الواردة في هذا الكتاب بما في ذلك عدد من العلاقات الموزعة هنا وهناك ، وربما إذا هو تعامل مع رياضيات هذا الكتاب ، لحكم عليه أنه أولا وأخيراً كتاب رياضي .

نعم أنه كتاب رياضي ، فنظرية الاتصالات هي نظرية رياضية ، ولأن هذا الكتاب يعرض لهذه النظرية ، فهو ملزم لذلك بالرياضيات . يجب على القارئ في هذا السياق أن يميز بين الرياضيات وبين المصطلحات المستخدمة . إذ يمكن للكتاب أن ينطوي على كم كبير من الرياضيات من دون أن يحتوي على رمز واحد أو إشارة مسلوطة .

لقد تطرق الهنود البابليون إلى معالجات رياضية واسعة بما في ذلك أجزاء هامة من الجبر ، وذلك دون أن يستخدموا أكثر من الكلمات والجمل ، إذ أن المصطلحات الرياضية ولدت بعد ذلك ، تهدف هذه المصطلحات إلى تبسيط الرياضيات ، وهي تحقق هذا الغرض فعلاً لمن يصبح ملماً بها . أما ما تفعله المصطلحات المذكورة فهو استبدال سلاسل طويلة من الكلمات المتواترة الاستعمال برموز بسيطة ، وتوفير أسماء بسيطة للكميات التي نتحدث عنها ، كذلك تهني لصياغة دقيقة للعلاقات وعرضها من ثم بشكل بياني بحيث تدرك العين في نظرة واحدة ارتباطات الكميات ببعضها تلك الارتباطات التي لن تظهر وستضيع بين ثنايا الجمل الواصفة لها ، وستفوت فرصة كبيرة لإدراك الصيغة الكلية للجمل والعلاقات دفعة واحدة .

وهكذا يقتصر دور المصطلحات الرياضية على تمثيل الرياضيات والتعبير عنها ، تماماً كما تمثل الأحرف الكلمات والعلامات الموسيقى . يمكن أن تمثل المصطلحات الرياضية ما لا معنى له أو لا شيء تحديداً ، كما في حالة الأحرف أو العلامات الموسيقية الموصوفة بشكل عشوائي . ينشأ بعض غريبي الأطوار أحياناً نصوصاً مليئة بالمصطلحات الرياضية وهي لا تعني في واقع الأمر أي نوع من الرياضيات .

حاولت في هذا الكتاب أن أضع كل الأفكار الهامة في كلمات وجمل ، ولأن المصطلحات الرياضية تمنح فرصة أكبر للفهم المبسط للأشياء فقد عمدت في معظم الحالات إلى اقحام هذه المصطلحات في صلب البحث . لقد شرحت ذلك عبر هذا الكتاب إلى حد ما ، وسأعرض هنا وجيزاً لهذه الشروح . وكذلك سأجرؤ على طرح بعض القضايا البسيطة المرتبطة التي لم تستخدم في هذا الكتاب آملاً أن يفيد منها القارئ في مجالات أخرى .

أول ما يواجهنا في المصطلحات الرياضية هو استخدام الأحرف لتمثيل الأعداد وأشياء أخرى أيضاً ، ففي الفصل الخامس مثلاً استخدمنا الرمز  $z$  للدلالة على زمرة أو سلسلة من الرموز أو الأحرف ، ربما زمرة من الأحرف ، بينما وظف الرمز  $m$  لتمييز أي الزمر نعني . يمكن مثلاً في حال كون الرمز  $m$  مساوياً الواحد أن تكون الزمرة  $B$  بالمقابل هي  $A, T, \bar{A}$  ، بينما لقيمة أخرى مثل ١٢١ ، قد تكون الزمرة  $K, I, D$  .

نستخدم في حياتنا العمليات الأربعة المعتادة : الطرح ، الضرب ، التقسيم ، والجمع بشكل متواتر . نستخدم أحياناً الأحرف للدلالة على الأرقام الواردة في هذه العمليات : مثلاً :

$$\begin{array}{l} \text{الجمع :} \\ 3 + 2 \\ 2 + 3 \end{array}$$

نقرأ العملية الثانية على الشكل :  $T$  زائد  $D$  ، ونفسرها على أنها حاصل جمع عددين يمثل أحدهما  $T$  ويمثل الآخر  $D$  .

$$\begin{array}{l} \text{الطرح : } 5 - 4 \\ \text{ك - ر} \end{array}$$

بالمثل نقرأ العملية الثانية ك ناقص  $R$  .

$$\begin{array}{l} \text{الضرب : } 3 \times 5 \text{ أو } 5 \cdot 3 \text{ أو } (3)(5) \\ \text{س} \times \text{ع أو س} \cdot \text{ع أو (س)(ع)} \end{array}$$

إذا لم نستخدم الأقواس في التمثيل الأخير لقراءنا الجداء  $3 \times 5$  على أنه العدد  $3 \cdot 5$  . نستطيع استخدام الأقواس للدلالة على جداء أي كميات نرغب بضربها ، مثلاً يمكننا كتابة  $س \times ع$  على الشكل  $(س)(ع)$  ، إلا أننا لا نحتاج ذلك في معظم الحالات . نقرأ  $(3)(5)$  على الشكل  $3$  ضرب  $5$  ، بينما نقرأ  $س \times ع$  كحرفين متتالين :  $س \times ع$  بدلاً من قراءتهما على الشكل  $س$  ضرب  $ع$  .

$$\begin{array}{l} \text{التقسيم : } 6 \div 3 \text{ أو } \frac{6}{3} \text{ أو } 6 / 3 \\ \frac{1}{ص} \text{ أو } 1 / ص \end{array}$$

نقرأ عادة  $\frac{1}{ص}$  وفق العبارة  $1$  على  $ص$  وليس  $1$  تقسيم  $ص$  .

تعامل الكميات المتضمنة في أقواس كعدد واحد ، مثلاً :

$$2 = \frac{6}{3} = \frac{(4+2)}{3}$$

$$24 = (2)(12) = (2)(8+4) \\ \text{ح} = (ب + ٤) = ٢ + \text{ح} = ب + \text{ح}$$

تقرأ ( ٣ + ب ) على الشكل ٢ زائد ب ، أو على الشكل : الكمية ٢ زائد ب ، اذا أدى الشكل الأول لبعض التشويش . وهكذا اذا قلنا ح ضرب ٢ زائد ب لكان المعنى الممكن : ح ٢ + ب على الرغم من أننا نقرأ العبارة الأخيرة وفق ما يلي : ح ٢ زائد ب . أما اذا قلنا ح ضرب الكمية ٢ زائد ب لكان واضحاً أننا نعني : ح ( ٢ + ب ) .

استخدم مفهوم الاحتمال في هذا الكتاب بشكل متواتر . يمكن أن نقول مثلاً أن احتمال الرمز ذي الترتيب م في سلسلة من الرموز هو ح ( م ) . نقرأ ذلك وفق العبارة : ح لـ م .

يمكن أن تكون الرموز كلمات ، أعداد ، أو أحرف ويمكن أن نتصور جدولة الرموز حيث تشير أعداد مختلفة للقيم الممكنة للرمز م مثلاً وما يقابل هذه القيم من أحرف . يوضح الجدول التالي هذه الفكرة :

قيمة م	الحرف المقابل
١	أ
٢	ب
٣	ت
٤	ث
٥	ج
٦	ح
٠	٠
٠	٠
٠	٠
الخ	الخ

عندما نود الإشارة إلى احتمال حرف معين ، ج مثلاً ، نستخدم المصطلح ح ( هـ ) لأن العدد هـ يحدد الحرف ج في الجدول ، إلا أننا نكتب عوضاً عن ذلك وبهدف التبسيط ح ( ج ) .

ما هو هذا الاحتمال ، انه نسبة عدد مرات ورود الحرف المعني الى عدد الاحرف الكلي في مقطع معين . وهكذا اذا ورد الحرف ي ١٣٠٠٠٠ مرة في نص يحتوي على ١٠٠٠٠٠٠ حرف كان ح ( ي ) مساوياً لـ :

$$\text{ح ( ي )} = \frac{١٣٠٠٠٠}{١٠٠٠٠٠٠} = ٠.١٣ = ١٣ \%$$

نتحدث أحيانا عن احتمال وقوع حادثين معا ، إما في وقت واحد ، أو على التتابع . نستخدم مثلا الحرف س للدلالة على الإشارة المرسلة والحرف ص للدلالة على الإشارة المستقبلية ، ويكون المصطلح ح (س،ص) دالاً في هذه الحالة على ارسال س واستقبال ص . نقرأ هذا المصطلح وفق العبارة : احتمال س ص حيث نعبر عن الفاصلة بوقفة قصيرة يمكن مثلا ان نرسل على وجه التخصيص الحرف و ونستقبل الحرف ب ، ويكون احتمال هذا الحادث ح ( و ، ب ) ، اما الامثلة الأخرى من ح ( س ، ص ) فكثيرة منها : ح ( ت ، ت ) ، ح ( ك ، د ) ، ..... الخ حيث ان كل هذه الامثلة تنتج عن تعويضات مناسبة في المصطلح ح ( س ، ص ) .

نتعامل أيضاً مع الاحتمالات الشرطية . مثلا إذا أرسلنا س ، ما هو احتمال أن نستقبل ص ، نصطلح على كتابة هذا الاحتمال الشرطي بالرمز ح (ص) ونقرأه وفق العبارة ح لـ ص بدلالة س . يستخدم بعض المؤلفين المصطلح ح ( ص | س ) للدلالة على الاحتمال الشرطي والذي يقرأ على الشكل : احتمال ص لدى توفر س . استخدمت شخصياً المصطلحات التي تبناها شاتون في بحثه الاصيل عن نظرية الاتصالات .

نكتب الآن علاقة رياضية بسيطة ثم نحاول تفسيرها :

$$\text{ح ( س ، ص )} = \text{ح ( س )} \times \text{ح ( ص | س )}$$

أي أن احتمال مواجهة س ، ص سوية تساوي احتمال مواجهة س لوحدها مضروباً في احتمال مواجهة ص عندما تكون قد واجهنا س للتو يمكن أن نصيغ هذا التفسير بشكل آخر فنقول إن عدد مرات ورود المشترك للرمزين س ، ص يساوي عدد مرات ورود الرمز س مضروباً بنسبة ورود الحرف ص بالمقارنة مع الأحرف الأخرى .

نحتاج في كثير من الأحيان لجمع عدد من الأشياء مع بعضها ، فمثل هذه العملية بالرمز  $\Sigma$  وهو مقلوب الحرف اليوناني سيكما . نفرض أن الرمز ص يمثل عدداً صحيحاً ، أي أن ص يمكن أن يكون ٠ ، ١ ، ٢ ، ٣ ، ..... الخ ونفرض أننا نود ترميز المجموع :

$$٨ + ٧ + ٦ + ٥ + ٤ + ٣ + ٢ + ١ + ٠$$

الذي يساوي بالطبع ٣٦ . نكتب هذا المجموع على الشكل :

$$\begin{array}{l} \text{ص} = ٨ \\ \text{ص} = ٧ \\ \text{ص} = ٦ \\ \text{ص} = ٥ \\ \text{ص} = ٤ \\ \text{ص} = ٣ \\ \text{ص} = ٢ \\ \text{ص} = ١ \\ \text{ص} = ٠ \end{array}$$

ونقرؤه : مجموع ص من ص تساوي صفر وإلى ص تساوي ٨ . هنا يعني الرمز  $\Sigma$  مجموع ، بينما المساواتان ص = ٠ ، ص = ٨ تعنيان من ص = ٠ إلى ص = ٨ . وأخيراً يعني ورود ص على اليسار أن ما نجمعه هو الأعداد الصحيحة ذاتها .

يمكن أن تكون هناك كميات مختلفة يلعب ص بالنسبة إليها دور الدليل . مثلاً احتمالات الأحرف وفق الجدول التالي :

قيمة ص	الحرف المقابل	احتمال الحرف ح (ص)
١	ا	٠.١٣١٠٥
٢	ب	٠.١٠٤٦٨
٣	ت	٠.٠٨١٥١
٤	ث	٠.٠٧٩٩٥
٥	ج	٠.٠٧٠٩٨
٦	ح	٠.٠٦٨٨٢
٧	خ	٠.٠٦٣٤٥
٨	د	٠.٠٦١٠١
٩	ذ	٠.٠٥٢٥٩
١٠	ر	٠.٠٣٧٨٨
١١	ز	٠.٠٣٣٨٩
١٢	س	٠.٠٢٩٢٤
١٣	ش	٠.٠٢٧٥٨
١٤	ص	٠.٠٢٥٣٦
١٥	ض	٠.٠٢٤٥٩
١٦	ط	٠.٠١٩٩٤
١٧	ظ	٠.٠١٩٨٢
١٨	ع	٠.٠١٩٨٢
١٩	غ	٠.٠١٥٣٩
٢٠	ف	٠.٠١٤٤٠
٢١	ق	٠.٠٠٩١٩
٢٢	ك	٠.٠٠٤٢٠
٢٣	ل	٠.٠٠١٦٦
٢٤	م	٠.٠٠١٣٢
٢٥	ن	٠.٠٠١٢١
٢٦	هـ	٠.٠٠٠٧٧
٢٧	و	٠.٠٠٠٣٠
٢٨	ي	٠.٠٠٠١٠

إذا أردنا جمع هذه الاحتمالات لكتبتنا :

$$\begin{array}{c} ٢٨ \\ \text{ص} = \text{ح} ( \text{ص} ) \end{array}$$

ونقرأ هذا المجموع : مجموع ح ( ص ) من ص تساوي ١ الى ٢٨  
تساوي هذه الكمية الى الواحد تقريبا . إن نسبة عدد مرات ورود  
الحرف ا في كل حرف مضافة الى النسبة المقابلة في حالة ب وهكذا لكل  
الاحرف يصل بنا الى نسبة ورود اي حرف في الحرف اي ا .

إذا كتبتنا :

$$\begin{array}{c} \text{ح} ( \text{ص} ) \\ \text{ص} \end{array}$$

فنعني المجموع لكل قيم ص ، اي كل ما يمثل اي شيء . ونقرؤه :  
مجموع ح (ص) عبر ص . اذا كان ص حرفاً أبجدياً فسننفذ عملية الجمع  
ال ٢٨ احتمالا مختلف .

نتعامل أحيانا مع تعابير تتضمن حرفين مثل س ، ص ونرغب بإجراء  
عملية الجمع بالنسبة لاحد هذين الدليلين . يمكن أن يكون الرمز ح  
(س ، ص) هو احتمال ورود الحرف س متبوعاً بالحرف ص ، في حالة  
زوج الاحرف ر د مثلاً . يكون هذا الاحتمال : ح ( ر ، د ) ، ونكتب  
بشكل مشابه :

$$\begin{array}{c} \text{ح} ( \text{س} ، \text{ص} ) \\ \text{ص} \end{array}$$

ونقرأ هذا المجموع : مجموع ح د س ، ص عبر ص ، يعني ذلك  
اعتبار كل قيم ص الممكنة وإجراء المجموع عبرها .

$$\begin{array}{c} \text{ح} ( \text{س} ، \text{ص} ) = \text{ح} ( \text{س} ) \\ \text{ص} \end{array}$$



ونقرأ هذه العلاقة : مجموع ح د س ، ص عبر ص يساوي ح د س .  
 بشكل أوضح : اذا جمعنا احتمالات ورود كل حرف بعد حرف معين  
 نحصل ببساطة على احتمال ورود هذا الحرف ، لان ورود الحرف المعني  
 سيراافق ب ورود حرف تال له .

نحتاج لتمثيل عدد مضروب في نفسه مرات متتالية ، اضافة  
 لاستخدامنا الجمع والطرح والضرب والتقسيم . فمثل هذه العملية  
 بالرمز :  $2 = 2$

اي ان العدد المضروب بنفسه هو ٢ ، بينما عدد مرات ضربه بنفسه  
 في هذا المثال الخاص هو مرة واحدة .

$$2 = 2$$

اي ٢ مرفوعة للقوة ٢ ، ١ وهو مربع ال ٢ .

$$8 = 2^3$$

اي ٢ مرفوعة للقوة ٣ ، وهو مكعب ال ٢ ، اي ٢ مضروبة بنفسها  
 ثلاثة مرات .

سمي في هذه الامثلة ٢ بالاساس ، بينما ١ ، ٢ ، ٣ كل منها قوة  
 او اس .

وبشكل عام اذا كتبنا  $2^n$  فتعني ٢ مضروبة بنفسها ن مرة .

يجب ان نضيف الى ذلك ، بهدف الابقاء على الاتساق في الرياضيات  
 التعريف التالي :  $1 = 2^0$

اي اننا اذا رفعنا اي عدد للقوة . كان الناتج واحد على الدوام  
بصرف النظر عن هذا العدد .

تستخدم الرياضيات ايضا الاس الكسري او السالب :

$$\frac{1}{2/1} = \frac{1}{\frac{2}{1}} = \frac{1}{2} = \frac{1}{2}$$

$$\frac{1}{\frac{2}{1}} = \frac{1}{2} = \frac{1}{2}$$

من خصائص القوى :

$$2 + \frac{1}{2} = \frac{1}{2} \times \frac{1}{2}$$

وكاملة على ذلك نكتب :

$$\frac{1}{2} = \frac{1}{2} \times \frac{1}{2}$$

$$\frac{1}{2} = \frac{1}{2} \times \frac{1}{2}$$

$$\frac{1}{2} = \frac{1}{2} \times \frac{1}{2}$$

اما التابع الرياضي الهام الذي استخدمناه في هذا الكتاب فهو  
اللوغاريتم . يمكن للوغاريتم ان يتخذ اي اساس ، الا ان الاس الذي  
استخدمناه في هذا الكتاب هو ٢ . اذ اعطينا عددا ما ، يعرف لوغاريتم  
هذا العدد من الاس ٢ على انه القوة او الاس التي اذا رفعنا اليها  
العدد ٢ كان الناتج هو العدد المعطى لنا ونشير الى هذا اللوغاريتم  
بالمصطلح لوج حيث س هو العدد المعطى لنا . وهكذا يكون لدينا وفق  
هذا التعريف :

$$x^s = 2^s$$

مثلاً :

$$8 = 2^3 = 2^{3 \log 8} = 2^3$$

ندرج هنا بعض اللوغاريتمات من الأساس ٢ :

العدد س	لوغاريتمه لع س
١	٠
٢	١
٤	٢
٨	٣
١٦	٤
٣٢	٥
٦٤	٦

نوجز بعض خواص اللوغاريتم فيما يلي :

$$\log (a \times b) = \log a + \log b$$

$$\log \frac{a}{b} = \log a - \log b$$

$$\log a^x = x \log a$$

لا تستخدم اللوغاريتمات من الأساس ٢ إلا في نظرية المعلومات ، بينما تستخدم اللوغاريتمات من الأساس ١٠ أو الأساس  $e$  بشكل أكبر في فروع أخرى من العلم ، علماً بأن العدد  $e$  هو العدد الطبيعي النابيري :

$$e = 2.718 \dots$$

إذا طورنا مصطلحاتنا ، فرمزا للوغاريتم  $s$  من الأساس ٢ بالرمز  
 $\text{لع } s$  ، ومن الأساس عشرة بالرمز  $\text{لع } s$  ، ومن الأساس  $e$  بالرمز  
 $\text{لع } s$  ، لحصلنا على العلاقات التالية :

$$\frac{\text{لع } s}{\text{لع } 10} = \text{لع } 10 \times \text{لع } s$$

$$\text{لع } s = \text{لع } 3.32 \times \text{لع } s$$

$$\frac{\text{لع } s}{\text{لع } e} = \text{لع } e \times \text{لع } s$$

$$\text{لع } s = \text{لع } 1.44 \times \text{لع } s$$

تدعى اللوغاريتمات من الأساس  $e$  باللوغاريتمات الطبيعية ولها  
 بعض الخصائص الرياضية البسيطة والهامة . مثلاً إذا كان  $s$  أقل  
 بكثير من الواحد تتحقق العلاقة :

$$\text{لع } (1 + s) = \text{لع } s$$

لقد استخدمنا هذا التقريب في الفصل الخامس .

يشير أخيراً إلى أن ورود المصطلح  $\text{لع } s$  في هذا الكتاب ، عنى في  
 الواقع  $\text{لع } s$  .

## المؤلف في سطور

ولد الدكتور جون . ر . بيرس في ديس مونس بولاية آيوا في اميركا عام ١٩١٠ وترعرع في الغرب الاوسط الاميركي . تلقى علومه الجامعية في معهد كاليفورنيا التكنولوجي حتى حصوله على درجة الدكتوراه في الهندسة الكهربائية .

التحق عام ١٩٣٦ بشركة بيل للهاتف وشغل فيها عدة مناصب حتى عام ١٩٧١ حيث تركها وعاد الى معهد كاليفورنيا التكنولوجي حيث يعمل الآن في منصب التكنولوجي الاول في مختبر الدفع النفاث .

ظهرت مؤلفات الدكتور بيرس في مجلة العلم الاميركي ومجلة الاطلسي الشهرية ومجلة كورونيت ومجلات خيال علمي اخرى . اما كتبه الاخرى فهي : عالم الانسان الصوتي ، امواج الالكترن ورسائله ، الامواج والاذن ، انابيب الامواج المتحركة ، نظرية وتصميم الاشعة الالكترونية ، كل شيء عن الامواج ، واخيرا مقدمة الى علم وانظمة لاتصالات .

ينتمي الدكتور بيرس لعضوية عدة جمعيات علمية منها : الاكاديمية الوطنية للعلوم ، الاكاديمية الوطنية للهندسة ، الاكاديمية الاميركية للفنون والعلوم ، الاكاديمية السويدية الملكية للعلوم ، نقابة المهندسين الالكترنيين والكهربائيين ، جمعية الفيزياء الامريكية ، وجمعية الصوتيات الاميركية .

نال الدكتور بيرس عشر درجات تقديرية وعدد من الاجوائز منها : الميدالية الوطنية للعلوم ، ميدالية اديسون ، وميدالية الشرف ، جائزة مؤسسي الاكاديمية الوطنية للهندسة ، ميدالية سيدغرن ( من السويد ) وميدالية فالدمار بلولسون ( من الدنمارك ) .



# الفهرس

٥	امداء المؤلف
٧	مقدمة المؤلف
	الفصل الاول :
١.٣	العالم والنظريات
	الفصل الثاني :
٣٥	اصول نظرية المعلومات
	الفصل الثالث :
٦٧	نموذج رياضي
	الفصل الرابع :
٩١	الترميز ونظام المد الثنائي
	الفصل الخامس :
١.٠٩	الانتروبي
	الفصل السادس :
١٤٥	اللفة والمعنى

	<b>الفصل السابع :</b>
١٦٧	الترميز الفعّال
	<b>الفصل الثامن :</b>
١٩١	القناة ذات الضجيج
	<b>الفصل التاسع :</b>
٢١٧	مدة إبعاد
	<b>الفصل العاشر :</b>
٢٣٩	نظرية المعلومات والفيزياء
	<b>الفصل الحادي عشر :</b>
٢٦٩	السيبرنيتيك
	<b>الفصل الثاني عشر :</b>
٢٩٥	نظرية المعلومات وعلم النفس
	<b>الفصل الثالث عشر :</b>
٣١٩	نظرية المعلومات والفن
	<b>الفصل الرابع عشر :</b>
٣٣٩	عودة الى نظرية الاتصالات
٣٥١	ملحق رياضي
٣٦٣	المؤلف في سطور









الاعلام ، المعلومات ، الاعلاميات ، الاتصال والتواصل ، تزايد الملائق البشرية المستمر ، تنقدها ، اتساع اثراتها ... ان تحفظ اكبر عدد ممكن من المعلومات في جهاز صغير بمتناول يدك تطلب منه ان يمد لك بعضا منها ، او كلها ، متى شئت وكيف شئت تلك حقائق نهاية القرن الحالي والقرن الذي يلي ، وحاجة انسان اليوم والغد وهوسه . والعلم ، أي علم ، ولید حاجة صارت ملحة للعقل يسمي الى تلبيةها .

لهذا كانت السيبرنتيكا التي أصدرت الوزارة عنها كتابا هو في الواقع مقدمة لكتابنا هذا . وعن السيبرنتيكا نشأت الاعلاميات ونظرية المعلومات ، فما هي هذه النظرية التي بها وبها وحدها تكاد تتميز معرفيا المرحلة التاريخية الراهنة عن غيرها .

هذا الكتاب هو محاولة لوضع النظرية هذه في متناول انسان المستقبل . لن يجد القارئ كتابنا هذا سهلا ولكن ثمة حقيقة عليه ان يعرفها مسبقا وهي أن الذين يجيدون الاعلاميات هم الذين يتصرفون بمصائر الشعوب . أو تظن أيها القارئ العزيز أن من السهل على الانسان فردا وجماعات أن يدخل القرن الواحد والعشرين وهو محتفظ بشخصيته القومية والحضارية الموروثة هي كما هي ؟ ...

ان نظرية المعلومات هي التي سترسم للانسان خطا سيره في المستقبل المنظور ، وربما الغير منظور .

الطبع وفرز الألوان في مطابع وزارة الثقافة

دمشق ١٩٩١

في الاقطار العربية ما يماثل  
٢٠٠ ل.س

سعر النسخة داخل القطر  
١٠٠ ل.س